



**Frederico Bravo de
Almeida Pereira
Campos**

**Avaliação do estado de deformação em processos
de conformação através de visão artificial**



**Frederico Bravo de
Almeida Pereira
Campos**

**Avaliação do estado de deformação em processos
de conformação através de visão artificial**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Ricardo José Alves de Sousa, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos

Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Miguel Armando Riem de Oliveira

Investigador do Instituto de Engenharia Eletrónica e Telemática de Aveiro

Prof. Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Jorge Ferreira e ao Professor Doutor Ricardo Sousa, pela orientação, pela ajuda disponível e pela contribuição ativa no desenvolvimento e melhoria do presente documento.

Um especial agradecimento à equipa do Laboratório de Automação e Robótica pela sabedoria partilhada e pelo companheirismo.

Aos meus colegas Ricardo Bastos e Diogo Oliveira, pela disponibilidade e valiosos conhecimentos.

A todos os meus amigos, pela confiança e motivação que depositaram em mim.

Às empresas Infaimon e Motofil, pela oportunidade na disponibilização do equipamento necessário à realização dos testes.

Finalmente, aos meus familiares pelo suporte, ajuda, afeto e dedicação, valores fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

Um muito obrigado a todos.

Palavras-chave

Percepção tridimensional; Visão Artificial; Estereoscopia; Deformações

Resumo

Este trabalho enquadra-se na área da 'percepção tridimensional', e o objetivo principal consiste no desenvolvimento de um sistema que permita, através de técnicas de visão artificial, avaliar o estado de deformações relativamente a processos de conformação plástica.

Inicialmente procede-se à conformação de uma chapa metálica de dimensões conhecidas, através de estampagem incremental.

Posteriormente, com o auxílio de duas câmaras de elevada resolução em posições distintas, utilizando as técnicas de estereoscopia, é obtido um modelo tridimensional da chapa deformada.

Seguidamente, são calculadas as deformações aplicadas à chapa e apresentados resultados variados, tais como a visualização do campo de deformações ao longo da peça.

Finalmente, este método é avaliado e comparado com outro método existente de Visão Artificial existente no mercado.

Keywords

Tridimensional Perception; Artificial Vision; Stereo Vision; Sheet Metal Forming

Abstract

The present document is related to 'Tridimensional Perception' and the main objective consists in the development of a system that permits through techniques of artificial vision evaluate the state of deformation of sheet metal forming processes.

We start by deforming a sheet metal plate of known dimensions through the incremental stamping process.

Then, using two digital high resolution cameras in different positions, based on the stereo vision techniques, a three dimensional model of the deformed plate is obtained.

Finally, the deformations applied to the sheet metal plate are calculated and then several results are presented such as the full-field surface deformation throughout the total area of the plate.

The final results obtained are also validated with Artificial Vision technology existing in the market today.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Tabelas	v
Lista de Figuras	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Guia de leitura	2
2 Revisão do Estado da Arte	3
2.1 Conformação de chapas metálicas	3
2.1.1 Estampagem incremental	3
2.2 Necessidades de medição de deformação e curvas limite de conformação . .	4
2.2.1 Estimativa da curva limite de conformação	5
2.3 Técnicas de medição de deformação já existentes	5
2.4 Técnicas de Visão Artificial utilizadas para o cálculo de deformações . . .	7
2.4.1 DIC - Digital Image Correlation	7
2.4.2 Interferometria	9
2.5 Aplicações e hardware disponíveis no mercado para medição visual	10
2.5.1 (1)Gom - Argus	10
2.5.2 (2)ViaLux - AutoGrid	11
2.5.3 (3)FMTI - Grid Analyzer Model 100U	11
2.5.4 (4)ASAME - Target Model, 2D Model and GPA	12
2.6 Enquadramento	13
3 Metodologia	15
4 Implementação	17
4.1 Marcação do padrão	17
4.2 Cuidados na aquisição de imagens	18
4.2.1 Câmaras inteligentes	18
4.2.2 Estúdio e iluminação	19
4.3 Calibração	20
4.3.1 Modelo de câmara e propriedades óticas	20
4.3.2 Procedimento de calibração	21

4.4	Procedimento de aquisição de imagens	23
4.5	Tratamento e segmentação de imagens	23
4.5.1	Equalizador do histograma	24
4.5.2	Binarização ou thresholding	25
4.5.3	Operações morfológicas	26
4.5.4	Selecionar região de interesse (ROI)	27
4.5.5	Procura de pontos em falta na grelha	28
4.5.6	Reconstrução da grelha	30
4.6	Cálculo estéreo	31
4.6.1	Princípio de funcionamento	31
4.6.2	Correspondência	31
4.6.3	Triangulação	32
4.6.4	Reconstrução tridimensional	33
4.7	Cálculo de deformações	34
4.7.1	Metodologia de Vogel e Lee	35
5	Casos de Estudo	39
5.1	Ensaaios realizados	39
5.1.1	Baselines	41
5.1.2	Geometrias	42
5.1.3	Tipo de padrão	45
5.1.4	Densidade do padrão	45
5.1.5	Câmaras utilizadas	45
5.2	Reconstruções tridimensionais (3D)	46
5.3	Deformações	48
5.3.1	Aplicação do método de Vogel e Lee	49
5.3.2	Análises de deformações	50
6	Discussão de resultados	53
6.1	Reconstruções tridimensionais (3D)	53
6.1.1	Análise quantitativa da reconstrução tridimensional (3D)	53
6.1.2	Análise qualitativa da reconstrução tridimensional (3D)	56
6.2	Deformações	57
6.2.1	Análise quantitativa do processo de deformações	57
6.2.2	Análise qualitativa do campo de deformações	60
7	Conclusões	65
7.1	Conclusões	65
7.2	Trabalho futuro	66
	Referências	67
A	Apêndice - Fanuc	71
B	Apêndice - Imagens de calibração	73
C	Apêndice - Nuvens de pontos	75

D	Apêndice - Reconstruções	77
E	Apêndice - Major strains	79
F	Apêndice - Minor strains	81
G	Apêndice - Mapas de deformações	83
H	Apêndice - Aquisição com sistema Argus	85

Lista de Tabelas

6.1	Tabela de precisões	56
-----	-------------------------------	----

Lista de Figuras

2.1	Chapa metálica	3
2.2	Exemplo de curva CLC	4
2.3	Área de fratura em provete	5
2.4	Exemplo de corpos de prova para determinar a curva CLC pelo método de Nakazima	5
2.5	Mylar tape	6
2.6	Hand Held CCD camera	6
2.7	Braço portátil MMC	7
2.8	Digital Image Correlation	8
2.9	Digital Image Correlation <i>tracking</i>	8
2.10	Franjas de Moiré	9
2.11	Electronic Speckle Pattern Interferometry	10
2.12	Gom - Argus system	10
2.13	Vialux - AutoGrid system	11
2.14	FMTI - Hardware	12
2.15	FMTI - Software	12
2.16	ASAME - GPA model	12
3.1	Fluxograma - Metodologia	15
4.1	Fanuc Robot M-6iB	17
4.2	Padrão aplicado com Fanuc	18
4.3	Genie M1600 features and camera	19
4.4	Estúdio e iluminação	20
4.5	Modelo de câmara <i>pinhole</i>	20
4.6	Reconhecimento cantos tabuleiro xadrez	22
4.7	Posição dos tabuleiros de xadrez em relação à câmara	22
4.8	Calibração estéreo	23
4.9	Par de imagens estéreo originais	24
4.10	Ajuste do histograma	24
4.11	Par de imagens estéreo equalizadas	25
4.12	Local <i>threshold</i> Bradley	25
4.13	Imagem com ruído	26
4.14	Imagem com ruído aglomerado	26
4.15	Imagem sem ruído	27
4.16	Máscara de região de interesse (ROI)	27
4.17	Região de interesse (ROI)	28

4.18	Pontos em falta no padrão da imagem esquerda	28
4.19	Algoritmo procura pontos em falta - 1ª parte	29
4.20	Sequência de pontos	29
4.21	Algoritmo procura pontos em falta - 2ª parte	30
4.22	Pontos em falta reconstruídos (zoomed)	30
4.23	Pontos correspondentes	31
4.24	Triangulação estéreo	32
4.25	Relação Disparidade vs Profundidade	33
4.26	Nuvem de pontos - Exemplo de caso de estudo	34
4.27	Exemplar de reconstrução utilizando Matlab - cftool	34
4.28	Malha quadrangular	35
4.29	Deformação triângulo	36
4.30	Mohr Circle	37
4.31	Nós da margem da malha	38
5.1	Organograma ensaios - Padrão pontos	39
5.2	Organograma ensaios - Padrão linhas	40
5.3	Organograma total	41
5.4	<i>Baseline Wide</i>	41
5.5	<i>Baseline Medium</i>	42
5.6	<i>Baseline Narrow</i>	42
5.7	G1 - Calota	43
5.8	Calota modelo tridimensional	43
5.9	G2 - Pirâmide	43
5.10	Pirâmide modelo tridimensional	44
5.11	G3 - Tornado	44
5.12	Tornado modelo tridimensional	44
5.13	Padrões utilizados	45
5.14	Sistema estéreo Bumblebee XB3	46
5.15	Núvens de pontos	46
5.16	Exemplar de reconstrução tridimensional (Matlab - gridfit)	47
5.17	Exemplar de reconstrução tridimensional (Matlab - cftool)	47
5.18	Exemplar de reconstrução tridimensional (Matlab - cftool contour)	48
5.19	Malha quadrangular	48
5.20	Organização da malha em losângulos	49
5.21	Organização da malha em diagonal	49
5.22	Caso de estudo de uma deformação local na geometria G1	50
5.23	Caso de estudo 'major strains' na geometria G1	51
5.24	Caso de estudo 'minor strains' na geometria G1	51
5.25	Caso de estudo do mapa de deformações na geometria G1	52
6.1	Processo medição em MMC	53
6.2	Processo obtenção da curva por MMC	54
6.3	Curva de perfil interpolada	54
6.4	Curva de perfil - G1	55
6.5	Diferenças entre curvas de perfil	55
6.6	Zona de maiores erros	56

6.7	Distância entre dois pontos	57
6.8	Campo de deformações 'major strains' - G1	58
6.9	Deformação para um ponto específico	58
6.10	Caso de estudo utilizando ARGUS	59
6.11	Caso de estudo utilizando ARGUS - G1	59
6.12	Caso de estudo utilizando ARGUS - G1	60
6.13	Campo de deformações 'major strains' - G1,V2	60
6.14	Campo de deformações 'major strains' - G2,V2	61
6.15	Campo de deformações 'major strains' - G3,V2	61
6.16	Curva de deformações - G1	62
6.17	Análise da simetria das 'major strains' - G1,V2	62
6.18	Campo de deformações 'minor strains' - G1,V2	63
6.19	Campo de deformações 'minor strains' - G2,V2	63
6.20	Campo de deformações 'minor strains' - G3,V2	64
A.1	Implementação Fanuc - Padrão de pontos	71
A.2	Implementação Fanuc - Padrão de linhas	72
B.1	Imagens de calibração	73
C.1	Nuvem de pontos G1	75
C.2	Nuvem de pontos G2	75
C.3	Nuvem de pontos G3	76
D.1	Reconstrução G1	77
D.2	Reconstrução G2	77
D.3	Reconstrução G3	78
E.1	Major strains G1	79
E.2	Major strains G2	79
E.3	Major strains G3	80
F.1	Minor strains G1	81
F.2	Minor strains G2	81
F.3	Minor strains G3	82
G.1	Mapa de deformações G1	83
G.2	Mapa de deformações G2	83
G.3	Mapa de deformações G3	84
H.1	Sistema Argus - Teste para geometria G1	85
H.2	Sistema Argus - Teste para geometria G2	85
H.3	Sistema Argus - Teste para geometria G3	86
H.4	Sistema Argus - Análise de deformações G1	87
H.5	Sistema Argus - Análise de deformações G2	87
H.6	Sistema Argus - Análise de deformações G3	88

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Há muito tempo que o homem sonha em construir uma máquina tão inteligente como o próprio Homem. Um dos seus requisitos seria a capacidade de processar dados visuais e conseguir extrair informação de diversos níveis conceptuais, desde o simples reconhecimento de contornos ao complexo reconhecimento de objetos, passando pelo reconhecimento de caracteres, a interpretação de imagens médicas, etc.

O campo da ciência que estuda este assunto denomina-se por Visão Artificial. Hoje em dia a Visão Artificial é uma componente essencial dos modernos sistemas de automação industrial. É também uma ferramenta usada no *Poka Yoke*, sem a qual a indústria atual não seria tão eficiente; seja na prevenção e identificação de defeitos, seja no controlo dimensional ou em inúmeras outras aplicações. A Visão Artificial possibilita a realização de diversas tarefas, preservando a atividade humana, exposta à fadiga, subjetividade e a erros associados.

1.2 Objetivos

Com este trabalho pretende-se desenvolver um sistema, baseado em técnicas de visão artificial, que permita o cálculo e a visualização do campo de deformações em chapas metálicas, utilizadas em processos de conformação por estampagem convencional e estampagem incremental, sem intervenção humana. As medidas necessárias para o cálculo das deformações deverão ser realizadas automaticamente após o processo de estampagem. Com a aplicação a desenvolver deverá ser possível:

- Visualizar em 3D a peça real;
- Visualizar o campo de deformações;
- Criar uma base de trabalho para uma futura livraria de análise de deformações para o processo de estampagem incremental;

O procedimento de medição deverá ser baseado na comparação automática entre imagens de alta definição obtidas antes do processo de conformação (obtidas após marcação de grelha visível com padrão conhecido na chapa original) e imagens obtidas durante e/ou no final do processo.

1.3 Guia de leitura

A presente dissertação divide-se em 7 capítulos.

O capítulo 1, Introdução, apresenta e sintetiza a motivação e objectivos do trabalho.

No capítulo 2, designado por Revisão do Estado da Arte, é abordado brevemente o tema da conformação de chapas metálicas e a necessidade de medição e monitorização das mesmas. São apresentadas e classificadas algumas das soluções de medição já existentes para esta finalidade, justificadas e suportadas por resultados da literatura. É ainda realizado um enquadramento desta revisão bibliográfica com o intuito de auxiliar o alcance dos objetivos traçados na dissertação.

O capítulo 3, Metodologia, pretende orientar e descrever sucintamente os procedimentos propostos para o funcionamento do sistema desenvolvido.

O capítulo 4, Implementação, pretende detalhar e exemplificar os passos mais importantes enumerados no capítulo 3. Desta forma, são apresentadas imagens obtidas do sistema desenvolvido, bem como algoritmos e fórmulas implementadas.

O capítulo 5, Casos de estudo, apresenta as várias condições e ensaios realizados ao longo deste trabalho.

O capítulo 6, Disussão de Resultados, tem como objetivo analisar e discutir os resultados obtidos. Este capítulo também calcula e evidencia os erros de vários casos de estudo, tendo como modelo de comparação outros sistemas de medição, tais como uma máquina de medição de coordenadas por pontos e o sistema de visão artificial comercial ARGUS.

O capítulo 7, Conclusões e Trabalho Futuro, apresenta as principais conclusões do trabalho realizado, evidenciando as principais ideias retiradas e obtidas através dos ensaios realizados. Para finalizar, são expostas as perspectivas para trabalhos e desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Revisão do Estado da Arte

2.1 Conformação de chapas metálicas

O processo de conformação de chapas metálicas (fig.2.1) teve origem no século XVIII, quando se desenvolveu um método de fabricação de copos e panelas em larga escala e com custos mais baixos que os métodos artesanais, utilizando o princípio de moldes machos e fêmeas. Desde então, tem vindo a evoluir continuamente, existindo hoje indústrias automatizadas produzindo peças de elevada complexidade e em grandes séries [1]. No entanto, dada a competitividade mundial, o seu desenvolvimento continua sendo um desafio, obrigando a mais estudos e melhorias.

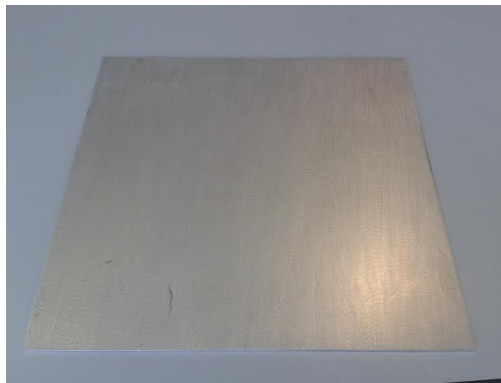


Figura 2.1: Chapa metálica

2.1.1 Estampagem incremental

As exigências e competitividade mundial deram origem a alguns conceitos e valores hoje imprescindíveis tais como redução de custos, minimização do *lead-time*, encurtamento dos ciclos de vida, mas ao mesmo tempo uma produção sustentável. A fim de responder a estes valores, surgiu a ideia de deformar plasticamente chapas metálicas por sucessivos incrementos, sem o uso de matriz e punção presentes na estampagem convencional. A estampagem incremental, também conhecida como *dieless process*, foi patenteada por Leszak em 1967 [2]. Este processo de estampagem, onde a deformação da chapa metálica ocorre localmente e progressivamente através de um incremento, tornou-se bastante

atrativo pelo facto de poder ser adaptado a uma máquina de comando numérico (CNC). Assim sendo, como a peça é produzida diretamente a partir de ficheiros de Desenho Assistido por Computador (CAD), permite mudanças de design rápido, tornando o processo flexível. Ainda as características do processo permitem produzir diversos componentes utilizando a mesma estrutura e ferramentas, reduzindo os desperdícios e minimizando a utilização de matéria prima. Uma desvantagem da estampagem incremental é que as peças produzidas possuem muitas vezes uma precisão inferior quando comparadas com o processo de estampagem convencional utilizando matriz e punção, principalmente devido a este método ser mais suscetível ao fenómeno de retorno elástico [3].

2.2 Necessidades de medição de deformação e curvas limite de conformação

Para realizar qualquer modificação na geometria de uma chapa metálica, evitando a utilização da técnica tentativa e erro, é necessário perceber e prever o seu comportamento mecânico na conformação. Deste modo, há uma significativa redução de desperdícios e de custos associados a estes [4]. Se por um lado a seleção do material com elevado grau de estampabilidade aumenta a probabilidade de sucesso da operação, por outro, o material representa uma fração elevada no custo total dos produtos. Assim sendo, a fim de reduzir os custos, são necessárias otimizações dos materiais utilizados e dos processos de estampagem para aumentar a competitividade do negócio. Como tal, pequenas diferenças nas propriedades do material, condições das ferramentas e prensas, lubrificação, entre outros parâmetros, podem influenciar o processo exigindo experiência e habilidade para realizar a avaliação do processo de estampagem [1]. Neste contexto, a obtenção da curva de limite de conformação (CLC) do material pode ser bastante útil. A curva de limite de conformação é a fronteira entre as deformações permissivas e catastróficas a que um material está sujeito num processo de conformação (fig.2.2). Por outras palavras, é o lugar geométrico que representa os níveis de tensão máxima a que a chapa pode ser submetida sem entrar em rutura. O comportamento das deformações de um componente estampado é comparado com a CLC em questão: qualquer combinação situada abaixo da curva significa deformações que o material pode suportar e, consequentemente, as localizadas acima da mesma serão referentes a deformações em que o material entra em rutura. Fatores como a espessura, textura ou atrito influenciam o posicionamento da curva mais para cima ou mais para baixo, ou seja, aumentando ou diminuindo a estampabilidade do material.

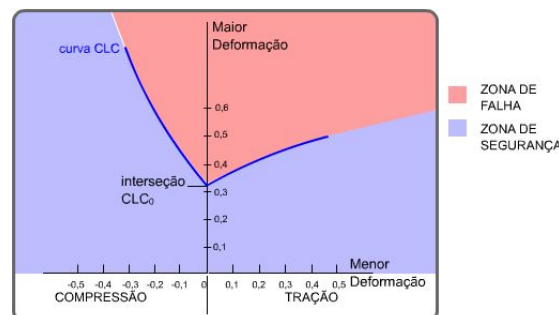


Figura 2.2: Exemplo de curva CLC

O diagrama FLD (Forming Limit Diagram) é a representação gráfica de deformações de ensaios reais no gráfico da curva CLC identificada acima (fig.2.2), no qual se pode avaliar a probabilidade de rutura do material.

2.2.1 Estimativa da curva limite de conformação

Para se determinar a curva de limite de conformação (CLC), existem três possibilidades: numérica, analítica e experimental. Dentro das possibilidades, a técnica experimental é a mais comum, que envolve sujeitar vários provetes metálicos a diferentes estados de tensão.

Vários investigadores desenvolveram métodos experimentais baseados no tamanho e forma das amostras utilizadas nos testes. Um dos testes mais conhecidos é o teste de Nakazima [5][6]. Este teste é efetuado através da deformação de uma amostra até à fratura, com o auxílio de um punção hemisférico e uma matriz circular. Posteriormente, são calculadas as deformações adjacentes à zona de rutura e na zona oposta e simétrica à zona de rutura (fig.2.3) [7].

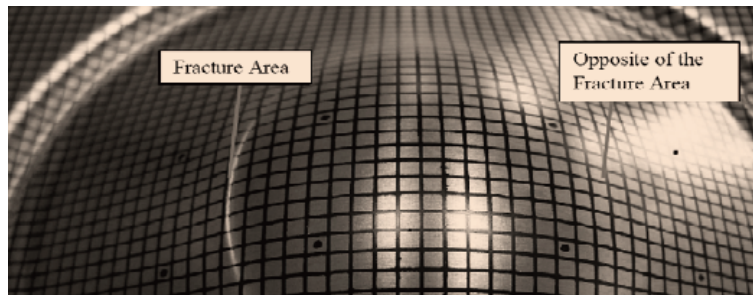


Figura 2.3: Área de fratura em provete [7]

Para se obter uma curva fiel, deve-se realizar esforços em várias amostras (fig.2.4), com diferentes geometrias, dimensões e condições de fricção, de forma a alterar os rácios de deformação.

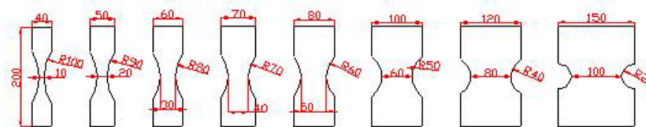


Figura 2.4: Exemplo de corpos de prova para determinar a curva CLC pelo método de Nakazima [7]

2.3 Técnicas de medição de deformação já existentes

Embora existam varias técnicas de medição de deformação, tal como a extensometria, apenas serão abordadas as mais comuns em processos de conformação plástica. Para

determinar o diagrama FLD e as deformações reais presentes na chapa metálica, é geralmente necessário estampar um padrão na chapa metálica. Esse padrão pode ser definido através de pontos, linhas ou ainda outras formas. Durante a operação de conformação plástica, o padrão será deformado com o material, permitindo desta maneira o cálculo de deformações, pela comparação do seu tamanho com o original antes da deformação ocorrer [8][9].

- Fita transparente de mylar graduada: A fita de mylar graduada é um aparelho utilizado para medir manualmente deformações em padrões de círculos. Este dispositivo é constituído por duas linhas divergentes escaladas (fig.2.5). Após um círculo ser deformado, origina uma elipse. A escala é então colocada em cima da elipse e deslocada até que o diâmetro maior da elipse fique alinhado com as linhas divergentes. A deformação em percentagem é obtida diretamente pela escala. Posteriormente, a fita é rodada de 90° para medir a deformação menor [10].

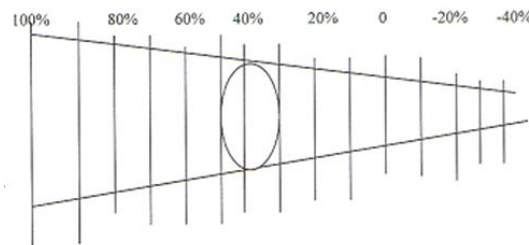


Figura 2.5: Mylar tape referencia [10]

- Hand Held CCD camera: A câmara portátil Hand Held CCD camera, desenvolvida por Ayres, permite a análise elementar de um padrão circular (fig.2.6)[11]. Este aparelho é centrado numa parte de interesse da superfície sobre o elemento do padrão em estudo, e a imagem é capturada pelo computador. O processamento da imagem identifica os *pixels* que representam o perímetro do círculo deformado (elipse) do padrão e automaticamente determinam as distâncias maior e menor da geometria, bem como as respetivas deformações.



Figura 2.6: Hand Held CCD camera [11]

- Máquinas de medição de coordenadas: As máquinas de medição de coordenadas, ou MMC's, são equipamentos que medem as características geométricas de qualquer tipo de peças (fig.2.7). Estas máquinas podem operar com ou sem contacto. No caso de serem com contacto, estas utilizam um localizador, também chamado apalpador, que ao entrar em contacto com a peça em estudo, relaciona o ponto de contacto do seu sensor com um ponto de referência conhecido dentro do sistema de coordenadas. Por outro lado, no caso de serem sem contacto, utilizam um laser ou um sistema de leitura ótica [12]. A determinação das coordenadas dos pontos sobre a peça serve de base para a determinação dos parâmetros de elementos geométricos tais como dimensão, forma e posição.



Figura 2.7: Braço portátil MMC [12]

- Medição através de Visão Artificial: A Visão Artificial é a ciência e tecnologia que estuda e desenvolve a construção de sistemas artificiais que obtêm informação tridimensional a partir de imagens ou quaisquer dados multi-dimensionais, para diversos fins. Atualmente já é utilizada para calcular deformações em processos de conformação plástica [13]. As técnicas de Visão Artificial são extremamente interessantes pelo facto de permitirem computorizar simultaneamente o campo de deformações na totalidade da superfície. Na secção seguinte (sec.2.4) serão citadas algumas das técnicas utilizadas.

2.4 Técnicas de Visão Artificial utilizadas para o cálculo de deformações

2.4.1 DIC - Digital Image Correlation

O método tri-dimensional digital de correlação de imagens (DIC) é um dos mais populares utilizados em engenharia para o cálculo de tensões e deformações. Foi originalmente desenvolvida por Sutton em 1986 [14] e desde então tem sido melhorado por vários investigadores. Este método, também conhecido como instrumento de medição baseado em estereoscopia, tem demonstrado grande potencialidade, dada a sua capacidade de calculo na totalidade do campo de visão, a sua robustez e técnica sem contacto para medir deslocamentos numa superfície de um objecto 3D.

O processo de correlação digital de imagens (DIC) permite calcular as deformações no campo total de uma superfície, através da comparação de duas imagens digitais, antes e após a deformação. Este método utiliza manchas aleatórias para estabelecer a correspondência entre pontos na imagem deformada e na imagem de referência. De forma a rastrear a localização de um ponto na imagem deformada, uma área de *pixels* quadrada à volta do ponto é escolhida e utilizada como janela de referência (fig.2.8). Um dado coeficiente de correlação é pre-definido para avaliar a similaridade da janela escolhida à janela alvo. Então, o ponto correspondente pode ser obtido por meio de procura do valor do coeficiente de correlação maior entre as duas janelas [15].

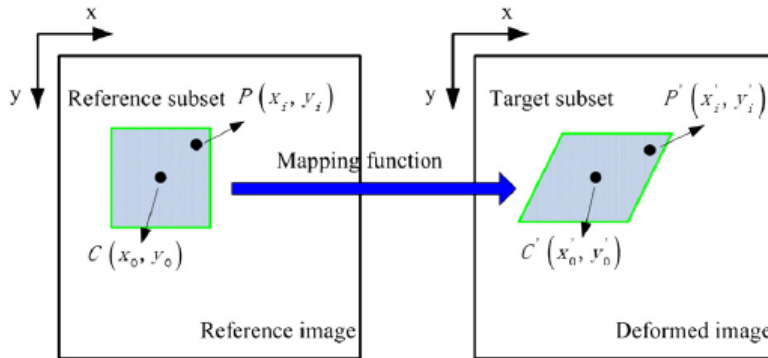


Figura 2.8: Digital Image Correlation [15]

Este método permite calcular as deformações ao longo do tempo, através do processo de *tracking*, isto é, à medida que a deformação vai ocorrendo, o método DIC vai efetuando a correspondência temporal entre os pontos, tal como exemplificado na figura 2.9.

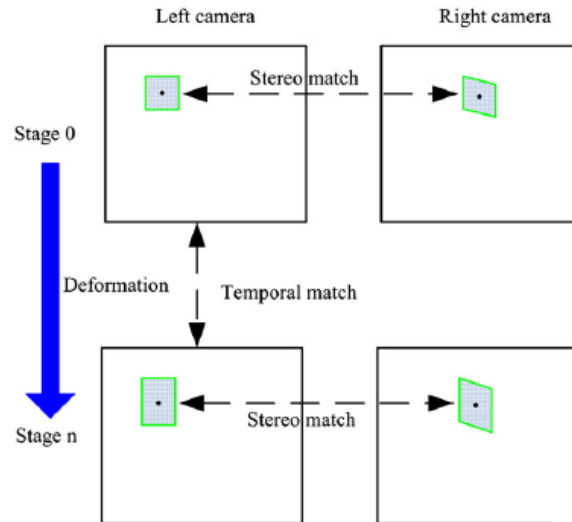


Figura 2.9: Digital Image Correlation *tracking* [15]

2.4.2 Interferometria

Interferometria é a técnica da sobreposição de duas ou mais ondas, o que cria como resultado uma nova e diferente onda que pode ser usada para explorar as diferenças entre as ondas de entrada. Uma vez que a interferência é um fenómeno geral entre ondas, a interferometria é aplicável a um largo espectro de campos, incluindo metrologia ótica.

- Interferometria Moiré: As técnicas fotomecânicas de Moiré baseadas em interferometria ótica são úteis para o cálculo de deslocamentos ao longo de uma superfície. Como se pode observar na figura 2.10, a técnica de Moiré envolve a interferência entre dois grupos de grades. Um dos gradeamentos é fixo no objeto de estudo e deformado, enquanto o segundo gradeamento é definido como padrão referência e portanto mantém-se inalterado. Ao sobrepor os dois gradeamentos, havendo um movimento relativo entre estes, é gerado um conjunto de faixas. Estas faixas, denominadas franjas de Moiré, permitem calcular os deslocamentos [16].

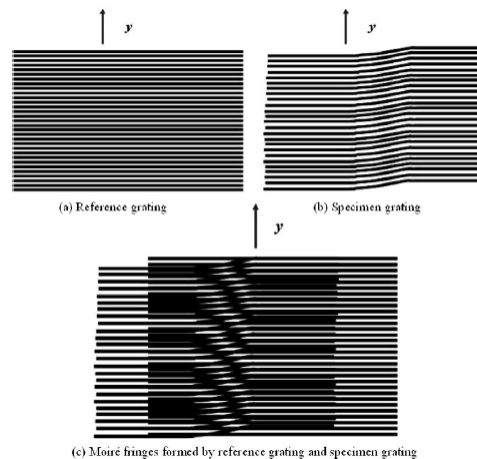


Figura 2.10: Franjas de Moiré [17]

- Interferometria Holográfica: A Holografia Interferométrica é uma técnica ótica que permite calcular deslocamentos em superfícies rugosas. Um holograma consiste no registo numa placa holográfica do padrão de interferência resultante da sobreposição de duas ondas emanadas da mesma fonte luminosa, uma direta e outra refletida pelo objeto a holografar, que dá a ilusão de relevo, quando iluminado por um feixe de raios laser ou luz branca. Para fazer uso desta técnica para o cálculo de deformações, é necessário sobrepor 2 hologramas, formando um holograma interferométrico: o primeiro regista um objeto sem qualquer deformações; o segundo regista o objeto ligeiramente deformado [18].
- Interferometria ESPI - Electronic Speckle Pattern Interferometry: A técnica ESPI é baseada na adição coerente de um campo *speckle* difundido por um objeto e um campo de referência, que são os dois braços do interferómetro. Quando o objeto é deformado, o comprimento de um dos dois braços do interferómetro altera-se, bem como a fase relativa dos dois campos originando uma alteração na intensidade do padrão resultante. O padrão de *speckle* deformado vai correlacionar com o

padrão inicial se a variação da diferença do percurso ótico for um inteiro múltiplo do comprimento de onda da fonte de luz, λ , e uma alteração total do contraste ocorrerá para uma variação de um múltiplo ímpar de $\lambda/2$ [18][19].

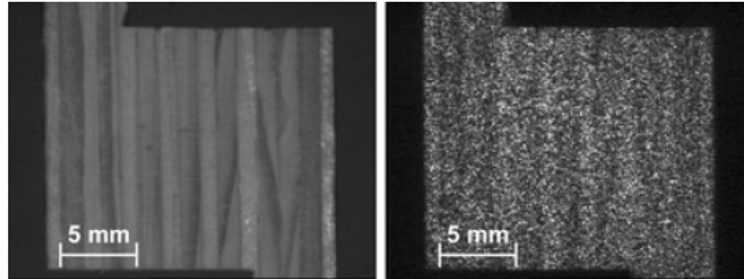


Figura 2.11: A imagem da esquerda representa uma superfície obtida pelo sistema ESPI. A imagem da direita representa um interferograma *speckle*.

2.5 Aplicações e hardware disponíveis no mercado para medição visual

As atuais aplicações típicas representativas de medições de deformações em processos de conformação plástica em chapas metálicas com alta precisão são (1) o sistema Argus da empresa Gom, (2) o sistema AutoGrid da empresa ViaLux, (3) o sistema Grid Analyzer Model 100U da empresa FMTI, (4) e o sistemas Target Model, 2D Model and GPA da empresa ASAME. Estas aplicações têm em comum o facto de utilizarem visão artificial, conseguindo assim obter elevados níveis de precisão de medição. No entanto, os preços são também elevados [9].

2.5.1 (1)Gom - Argus

Gom é uma empresa de sistemas óticos de medição fundada em 1990. Um dos seus produtos é o ARGUS (fig.2.12), um software de medição ótica, com o objetivo de determinar e estudar as alterações numa chapa metálica [17].

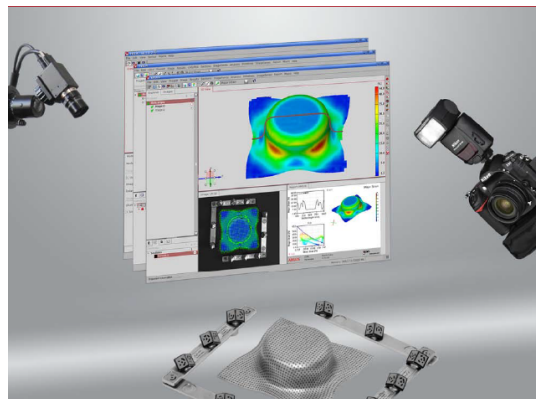


Figura 2.12: Gom - Argus system [17]

Este software consegue computerizar, por exemplo, a tensão máxima e mínima, a redução de espessura e geometria da chapa. Ainda permite a possibilidade de construir o diagrama de limite de conformação (FLD) do material em questão, se as suas propriedades forem conhecidas. O princípio do sistema ARGUS é baseado em fotogrametria, também denominada por sensibilidade remota. Através deste método é possível reconstruir uma determinada geometria em 3D com base em imagens 2D. Inicialmente é gravado um padrão de pontos regular na chapa a ser analisada, através de um método de electrólitos. Após a sua deformação, este padrão de pontos deixa de ser regular. As deformações que se verificam na chapa podem então ser calculadas com o sistema ARGUS, através da computerização das distâncias entre os pontos do padrão [20]. Como o sistema ARGUS trabalha em escalas de cinzento, as imagens devem ser em preto e branco. A localização dos pontos de um objeto no espaço são determinadas utilizando o processo de triangulação. Este software está disponível em várias configurações, de forma a providenciar soluções possíveis em cada situação. A principal variância entre cada configuração consiste no tipo de câmara usada, que pode variar entre uma resolução de 1624x1236 até uma resolução de 4288x2848 *pixels* [17].

2.5.2 (2)ViaLux - AutoGrid

A recente empresa alemã Vialux, fundada em 2000, tem sido já bastante referenciada mundialmente pelos seus sistemas óticos de metrologia. Esta empresa desenvolveu o sistema AutoGrid, um sistema que utiliza fotogrametria de alta precisão automaticamente, proporcionando ao utilizador uma solução possível em casos de conformação de chapas metálicas [21].

O dispositivo AutoGrid in-process (fig.2.13), constituído por 4 câmaras, providencia ao utilizador uma ferramenta de determinação das curvas limite de conformação em chapas metálicas. Este dispositivo calcula os valores de deformação exatamente antes da fratura da chapa. [22].

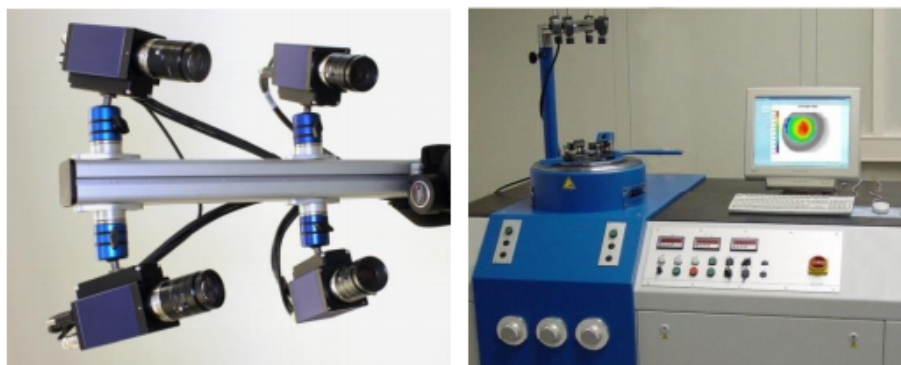


Figura 2.13: Vialux - AutoGrid system [22]

2.5.3 (3)FMTI - Grid Analyzer Model 100U

A empresa americana FMTI desenvolve hardware e software de automatização em medições de processos de conformação de chapas metálicas, com o auxílio de visão artificial. Os seus produtos são utilizados para o cálculo de deformações e tensões em

chapas metálicas, para implementações de 'Seis Sigma' [23]. Um dos seus produtos, o Grid Analyzer Model 100 (fig.2.14) [24] utiliza uma câmara portátil Handheld CCD para medições elementares do padrão. Este aparelho é centrado num elemento do padrão deformado pertencente à superfície da chapa metálica e a imagem é capturada pelo computador. Consequentemente, o software também desenvolvido pela empresa processa a imagem, identifica os *pixels* que representam o perímetro do elemento e automaticamente determina as deformações e tensões associadas à zona da chapa analisada.



Figura 2.14: FMTI - Hardware [24]

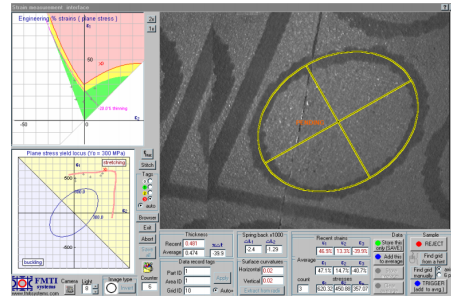


Figura 2.15: FMTI - Software [24]

2.5.4 (4)ASAME - Target Model, 2D Model and GPA

ASAME (Automatic Strain Analysis and Measurement Environment) é uma empresa americana bastante recente, formada em 2005, com o intuito de desenvolver sistemas óticos de medição de deformações em processos de conformação de chapas metálicas [25]. Os seus produtos, Target Model e o 2D Model, são sistemas de medição da distribuição das deformações ao longo da superfície num modelo deformado e numa chapa metálica plana, respetivamente, através de fotogrametria. O tempo de processamento para a chapa total varia entre 3 a 10 minutos. Adicionalmente, esta empresa criou também um sistema, utilizando uma câmara *handheld*, para medição de deformações localizadas. Este aparelho é aproximado da chapa metálica e captura um elemento quadrangular ou circular do padrão deformado. Através do processamento de imagens, as deformações são diretamente calculadas. Embora este processo apenas permita medir um elemento do padrão de cada vez, tem a vantagem de obter o valor da deformação imediatamente 2.16 [26].



Figura 2.16: ASAME - GPA model [26]

2.6 Enquadramento

Os métodos tradicionais de cálculo de deformações utilizados em processos de conformação plástica por estampagem (obtidas pelos métodos tradicionais com matriz e punção, ou por processos de estampagem incremental) implicam a realização de um número elevado de ensaios experimentais, normalmente com intervenção humana. Portanto, além de ser um processo bastante moroso e pressupor elevado custo de mão de obra, ainda tem baixa precisão [9].

Tais valores de deformação são essenciais nas fases de projeto, seja para distinguir os pontos críticos da peça, seja para aproximar a peça do seu limite de conformabilidade. Em consequência do desenvolvimento e melhoria dos processos de conformação plástica, surgiram novos métodos automatizados de determinação do campo de deformações, com elevada precisão. No entanto, estes métodos têm custos inaceitáveis para a maioria das empresas.

O presente trabalho pretende desenvolver um sistema com o objetivo de minimizar este problema, baseado em técnicas de Visão Artificial, que permita a determinação do campo de deformações da chapa metálica, de forma eficiente, rápida e sem intervenção humana. Com o auxílio de duas câmaras, através das técnicas de estereoscopia, o sistema deverá obter informações tridimensionais, de forma a reconstruir a chapa metálica em estudo. Posteriormente, o sistema deverá analisar e calcular as deformações presentes na chapa, de forma automática. Por fim, deverão ser apresentados os resultados, de forma intuitiva, para fácil reconhecimento das zonas críticas da peça em estudo.

Capítulo 3

Metodologia

O intuito deste capítulo é de descrever a metodologia proposta para o funcionamento do sistema, ou por outras palavras, os procedimentos necessários para obter os resultados esperados, desde o tratamento da chapa metálica até à obtenção de resultados. O fluxograma seguinte (fig.3.1) descreve a sequência de procedimento da metodologia proposta:



Figura 3.1: Fluxograma - Metodologia

Como podemos observar, no primeiro passo (1) é necessário cortar e tratar uma chapa metálica. Neste trabalho foram utilizadas chapas metálicas de forma quadrada, com 225 mm de lado, retiradas de uma planificação metálica de alumínio AL 1050 com 1 mm de espessura. O tratamento da chapa metálica inclui o seu polimento, de forma a realçar o brilho, importante para garantir um bom contraste entre a chapa metálica e o padrão a ser marcado. A marcação do padrão (passo 2) é feita com o auxílio do braço mecânico Robot Fanuc M-6iB, para garantir boa precisão na marcação do padrão. É possível marcar tanto um padrão de pontos regular como um padrão de linhas, formando uma grelha.

Assegurada a qualidade do tratamento da chapa e boa resolução do padrão, a chapa é então deformada (passo 3) utilizando uma máquina de estampagem incremental. A geometria final pretendida na chapa metálica é definida através do computador (CAD). De seguida, a chapa é fixa num suporte num estúdio fechado (passo 4), com luz e condições constantes, para ser estudada. O estúdio incorpora um par de câmaras estéreo, utilizadas para a aquisição de imagens. A distância entre as câmaras - *baseline* - é escolhida (passo 5) e mantida constante durante a operação de calibração e aquisição de imagens. Para um determinado *baseline*, é essencial calibrar as câmaras (passo 6), de forma a obter os parâmetros internos e externos de cada uma, sem os quais não seria possível a reconstrução tridimensional. Se o *baseline* não for alterado em relação à aquisição de imagens anterior, então este passo pode ser ignorado.

Segue-se o processo de aquisição de imagens (passo 7). As câmaras estéreo são conectadas ao computador, através dum cabo ethernet e, com o auxílio do programa CamExpert, o par de imagens estéreo é adquirido.

A partir deste ponto, os passos seguintes são todos referentes a processamento e pós-processamento de imagens, realizados no computador, mais precisamente no software Matlab. No tratamento de imagens (passo 8), várias operações tais como filtros morfológicos, remoção de ruído e *threshold* dos níveis de cinzento são utilizadas, com o objetivo de filtrar o padrão ou grelha. Tendo reconhecido o padrão referido, recorre-se à correspondência de pontos (passo 9). Com este processo pretende-se encontrar, para cada um dos pontos do padrão da imagem de referência (imagem esquerda), o respetivo ponto par correspondente na imagem par. Assim que a correspondência estiver concluída, o processo de triangulação (passo 10) permite calcular as coordenadas no mundo real de cada ponto, ou neste caso, cada par de pontos correspondentes. Para cada ponto PL na imagem esquerda, existe um PR na imagem direita correspondente e consequentemente um ponto P real no referencial mundo. Assim, ao apresentar graficamente todos os pontos P encontrados, obtemos a nuvem de pontos (passo 11). Posteriormente, ferramentas como o "cftool" ou o "gridfit" utilizam os dados das coordenadas da nuvem de pontos para criar uma superfície aproximada à chapa metálica deformada, denominada por reconstrução tridimensional ou modelo 3D (passo 12).

Para o cálculo de deformações (passo 13), foi utilizado um método de análise da distribuição de deformações baseado em malhas quadrangulares. A malha quadrangular é seguidamente ligada nas suas diagonais formando triângulos com uma orientação específica. Posteriormente, foram calculadas as deformações em cada triângulo ao longo da superfície. Por fim, os resultados (passo 14) podem ser visualizados de várias formas. Conforme a necessidade, são criados gráficos da distribuição das deformações, mapas de deformações, ou ainda ficheiros de formato .xls para exportação de dados a partir do Matlab.

Capítulo 4

Implementação

Este capítulo tem o intuito de descrever e detalhar os passos mais importantes referidos no capítulo 3 da Metodologia.

4.1 Marcação do padrão

A marcação de um padrão regular é imprescindível para a técnica utilizada, já que este permite tanto a reconstrução tridimensional como o processo de cálculo de deformações. Com a finalidade de marcar um padrão regular na chapa metálica com boa precisão (± 0.08 mm), utilizou-se o Robot Fanuc M-6iB (fig.4.1) [27].



Figura 4.1: Fanuc Robot M-6iB [27]

Foram programados no interface do Robot dois movimentos distintos: um para marcação de pontos igualmente espaçados; outro para marcação de linhas verticais e horizontais igualmente espaçadas (apêndice A - Fanuc). O número de linhas ou pontos é dado como input em ambos os movimentos programados, pelo que pode ser alterado. Contudo, normalmente foi utilizado um padrão de 40x40 pontos (1600 pontos) e, no caso das linhas, 40x40 linhas (1600 interseções/pontos). Em qualquer um dos casos, a densidade de 40x40 implica uma distância entre pontos/linhas de 5mm. No primeiro padrão referido, para o processamento de imagens, utiliza-se a informação dos próprios pontos; no último caso, utiliza-se a informação obtida pela interseção das linhas horizontais com as verticais.

Para a marcação do padrão foi fixada uma caneta de acetato permanente preta no manipulador do Robot, conferindo maior contraste com a chapa metálica. A figura ilustra uma chapa metálica com um padrão de linhas marcado.

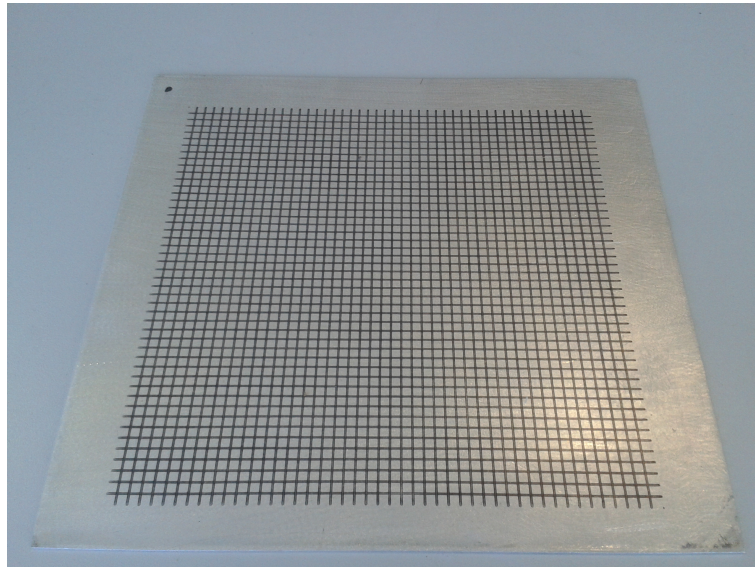


Figura 4.2: Exemplo de padrão aplicado com Fanuc

4.2 Cuidados na aquisição de imagens

A aquisição de imagens é possivelmente o passo mais importante para se obter bons resultados de medição. Imagens de fraca qualidade têm uma influência negativa na computação do padrão. De forma a adquirir as imagens com melhor qualidade, várias condições foram estudadas e respeitadas, tais como a escolha adequada das câmaras e rigorosa calibração das mesmas, bem como a criação de um espaço fechado (chamaremos estúdio em diante) onde seja possível controlar e minimizar as interferências exteriores, como por exemplo a luz incidente na chapa [28].

4.2.1 Câmaras inteligentes

A constante miniaturização dos componentes conduziu ao desenvolvimento e proliferação das câmaras inteligentes. Estas incorporam, não só os elementos tradicionais

das câmaras convencionais (sensor e eletrônica associados à captura), como também são acompanhadas de um processador, memória e sistema de comunicações com o exterior, compondo em si mesmas um sistema completo de visão artificial [29]. Para a realização deste trabalho foram utilizadas duas câmaras monocromáticas "Genie M1600 1/1.8" (fig.4.3). Estas câmaras, têm resolução de 1600x1200, frame rate 15 frames/s (em resolução máxima) e sensor 1/1.8", conferindo assim boa resolução das imagens, necessária para obtenção de resultados mais precisos. A Genie M1600 tira proveito da tecnologia gigabit Ethernet, transmitindo informação através do cabos CAT-5e e CAT-6 para distâncias até 100m. Como em todas as outras câmaras Genie, a M1600 é baseada em AIA (Automatic Imaging Association) GigE Vision Standard para conectar o dispositivo ao computador [30].

Feature Highlights	
<ul style="list-style-type: none"> • Active resolution of 1600 x 1200 • 8 or 10-bits Pixel Depth • High frame rates with vertical windowing • Engineered with Teledyne DALSA's Trigger-to-Image Reliability framework • GigE Vision compliant • Engineered to accommodate industrial style, screw mount, RJ-45 connectors • Options for C or CS-Mount lenses • Also available with Right-Angle lens mounts 	
Feature	Specification
Part Number	CR-GEN0-M160x
Resolution	1600 x 1200
Total Data Rate	61.3 MB/s
Max. Frame Rate	15 fps
Pixel Size	4.4 μ m
Number of Camera Taps	1
Output Format	GigE Vision
Size	44 mm x 29 mm x 67 mm
Mass	115 g




Figura 4.3: Genie M1600 features and camera [30]

4.2.2 Estúdio e iluminação

A iluminação do objeto em estudo é um parâmetro muitas vezes subestimado mas que tem uma influência crucial no sucesso do cálculo de deformações em sistemas de visão artificial. A situação mais desejável é que a área a ser medida tenha uma distribuição de luz homogênea. A luz utilizada deve ser o mais difusa possível, de forma a limitar a reflexão na superfície metálica. Se a reflexão ocorrer, o padrão deixa de ser visível, resultando numa perda de informação [28]. Além disso, uma correta iluminação permite utilizar menos filtros no tratamento da imagem, o que aumenta a velocidade de processamento.

De forma a evitar interferências nos resultados obtidos consoante a luz exterior, foi necessário desenvolver um estúdio fechado, que mantivesse as condições de iluminação constantes e adequadas. Neste espaço fechado foi então instalado um sistema de luzes LED, numa posição específica, de maneira a que a luz não incida diretamente na chapa (fig. 4.4). Para além disso, as paredes constituintes do estúdio foram revestidas com uma cartolina branca, de forma a melhorar a difusão da luz.



Figura 4.4: Estúdio e iluminação

4.3 Calibração

A calibração da câmara é uma etapa necessária a qualquer aplicação em visão artificial e tem por finalidade obter os parâmetros que tornarão possível mapear coordenadas tridimensionais do mundo em coordenadas bidimensionais de imagens [31]. Através deste processo é possível estimar as diversas constantes que definem as propriedades geométricas associadas a uma ou várias câmaras, segundo um determinado modelo.

4.3.1 Modelo de câmara e propriedades óticas

O modelo de câmara adoptado é o *pinhole* no qual a câmara é representada pelo seu centro ótico, situado entre o espaço tridimensional e o plano da imagem; e pelo eixo ótico, que é perpendicular ao plano da imagem e passa pelo centro ótico. O ponto de interseção do eixo ótico com o plano da imagem é denominado ponto principal. A distância entre o ponto principal e o centro ótico é designada por distância principal [32]. A figura 4.5 ilustra o modelo *pinhole* para facilitar a compreensão da geometria envolvida.

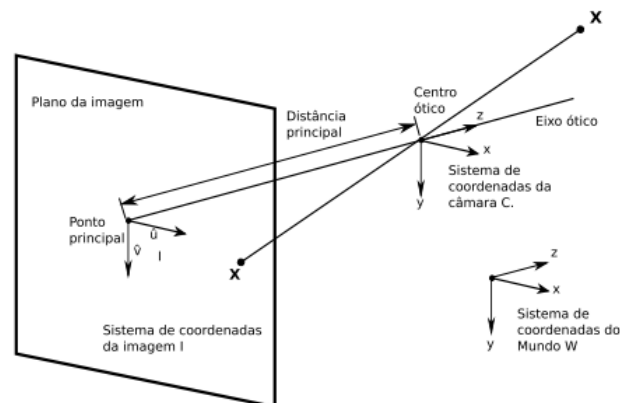


Figura 4.5: Modelo de câmara *pinhole* [33]

Os parâmetros envolvidos na calibração podem ser normalmente divididos em duas categorias: parâmetros intrínsecos e parâmetros extrínsecos. A transformação entre a lente da câmara e o plano da imagem (fig. 4.5) é caracterizada pela matriz intrínseca da câmara (expressão 4.1)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Os coeficientes α_x e α_y representam a distância focal; o coeficiente γ é o coeficiente de distorção entre x e y; os parâmetros u_0 e v_0 representam as coordenadas do ponto principal [32]. A matriz intrínseca é independente do cenário em que a câmara se encontra e uma vez estimada pode ser reutilizada, desde que a distância focal não se altere (no caso de câmaras com zoom) [33].

Por sua vez, os parâmetros extrínsecos descrevem a relação entre os referenciais da câmara e do mundo. A matriz dos parâmetros extrínsecos representa uma rotação e uma translação que relaciona os dois referenciais mencionados (expressão 4.2). Os valores de r_{ij} representam uma rotação, enquanto que os valores de t_i representam uma translação.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Desta forma, é possível estabelecer a relação entre as coordenadas de pontos do referencial do mundo W e o referencial da imagem I (fig.4.5) através da expressão 4.3 [33].

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \times \mathbf{R} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Os valores de X,Y e Z representam as coordenadas de um dado ponto no referencial mundo, enquanto que as coordenadas u e v representam as coordenadas do mesmo ponto no referencial da imagem.

Dada a importância destas matrizes, é necessário proceder à calibração adequada das câmaras, de forma a estimar todos os parâmetros envolvidos pela aplicação inversa da equação 4.3, ou seja, determinar os parâmetros da câmara a partir de dados conhecidos no mundo.

4.3.2 Procedimento de calibração

A calibração pode ser feita recorrendo à ferramenta *Camera Calibration Toolbox for Matlab®* [34]. Teoricamente, a calibração pode ser feita com um algoritmo de visão sobre um objeto qualquer, contudo, a *toolbox* está preparada para reconhecer um padrão de xadrez em fundo branco, devido ao elevado contraste. As dimensões do tabuleiro são um parâmetro de entrada na *toolbox*, pelo que não é imperativo utilizar um tabuleiro

standard. Para proceder à calibração utilizando esta ferramenta, é necessário capturar o tabuleiro de xadrez em vários ângulos e posições, para uma determinada posição fixa entre as câmaras (*baseline*). Executando esta ferramenta, as imagens são reconhecidas (apêndice B - Imagens de calibração) e procede-se à estimativa dos cantos do padrão de xadrez, como exemplificado na figura 4.6.

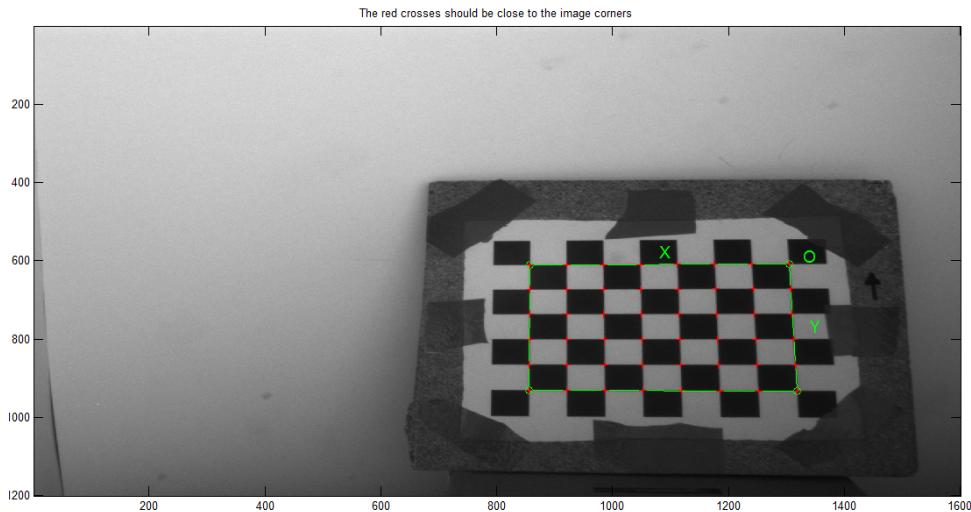


Figura 4.6: Reconhecimento cantos tabuleiro xadrez

Se os cantos não tiverem sido corretamente localizados, altera-se o valor da distorção da lente kc , de forma a corrigir o erro de estimativa.

Após a correcta estimativa da localização dos cantos do padrão axadrezado, procede-se à calibração propriamente dita: seleccionando a opção *Calibration*, no menu da toolbox obtém-se as matrizes intrínsecas e extrínsecas de cada câmara. Seleccionando a opção *Reproject on images*, é possível visualizar a estimativa dos cantos nas imagens iniciais. A *toolbox* permite ainda, entre outras opções, a visualização da posição do tabuleiro de xadrez em relação à posição da câmara, nas várias imagens de calibração (fig.4.7).

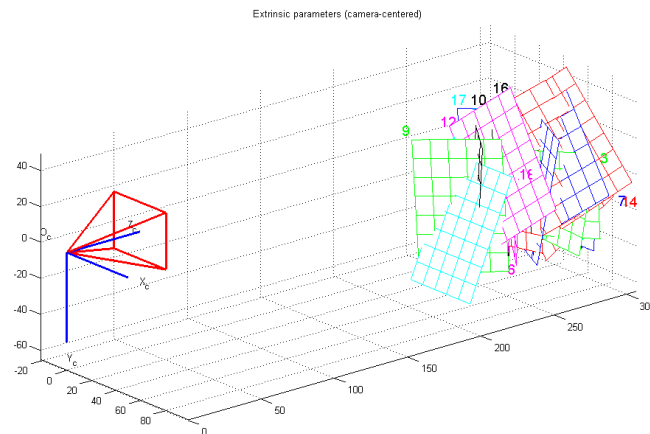


Figura 4.7: Posição dos tabuleiros de xadrez em relação à câmara

Finalizada a calibração individual de cada uma das câmaras, procede-se à calibração do sistema estéreo. Para tal, é necessário utilizar a funcionalidade *Run stereo calibration* da *toolbox*. Esta funcionalidade, através dos dados individuais das 2 câmaras, estabelece a calibração estéreo (fig.4.8).

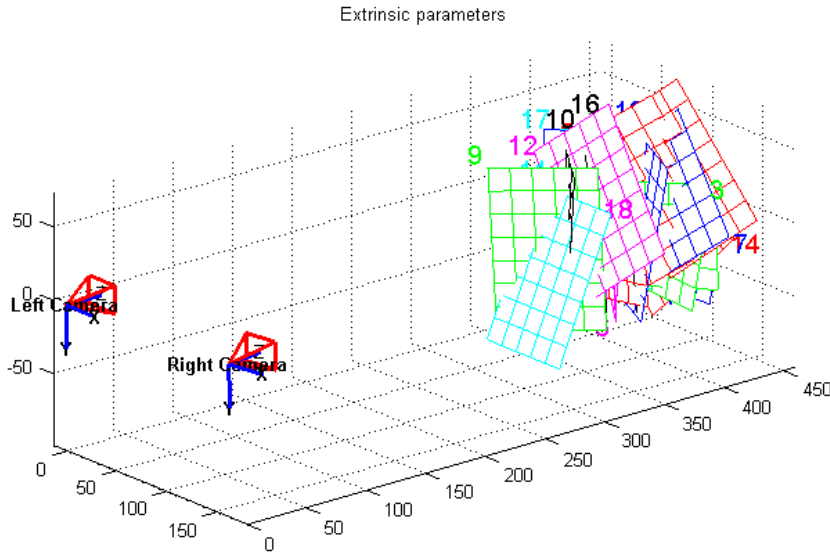


Figura 4.8: Calibração estéreo

4.4 Procedimento de aquisição de imagens

De forma a adquirir um par de imagens estéreo utilizando as câmaras Genie M1600, é necessário conectá-las ao computador através da tecnologia *ethernet*. Uma vez concluída a ligação entre as câmaras e o computador, a importação das imagens é feita através do software Sopera CamExpert, disponibilizado pelo fornecedor das câmaras inteligentes.

4.5 Tratamento e segmentação de imagens

O objetivo deste processo é de filtrar ou isolar o padrão para garantir resultados precisos na reconstrução 3D e pós-processamento da nuvem de pontos. Após a aquisição de um par de imagens estéreo (fig.4.9), é imprescindível realizar um bom tratamento de imagens para contrastar o padrão com a chapa e facilitar o seu isolamento.

Ainda que este processo seja crucial na metodologia deste sistema, este pode ser bastante simplificado se as condições anteriores tiverem sido rigorosamente cumpridas. Com o auxílio do software Matlab, foram aplicados vários tratamentos de imagem, tais como equalizadores de histogramas, filtros de *threshold*, operações morfológicas e outros tratamentos de dados.



Figura 4.9: Par de imagens estéreo originais

4.5.1 Equalizador do histograma

Os histogramas de uma imagem pretendem dar a conhecer a distribuição de intensidades numa imagem, isto é, são gráficos que fornecem informação sobre quantos *pixels* na imagem têm uma determinada intensidade [35].

O software Matlab já disponibiliza algumas funções de ajuste do histograma de uma imagem, tais como 'imadjust', 'adapthisteq', ou 'histeq'. Qualquer uma destas funções tenciona aumentar ou ajustar o contraste de uma imagem.

A função que melhor respondeu às necessidades foi a 'adapthisteq', embora todas possam ter utilidade numa situação específica. Esta função, além de aumentar o contraste dos níveis de cinzento, ainda expande o histograma, de forma a utilizar a gama total de valores entre 0 e 1 (fig.4.10).

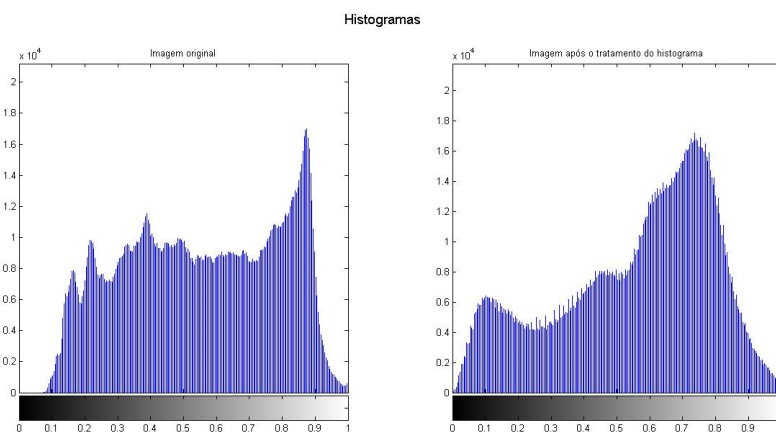


Figura 4.10: Histogramas - (Imagem esq.-inicial; Imagem dir.-final)

Foi criada uma função 'LerImagem', que possibilita, além da leitura automática do par de imagens estéreo, utilizar a função 'adapthisteq', conforme o índice de entrada

seja 0 ou 1. Na figura seguinte (fig.4.11) pode-se verificar a melhoria do contraste e equalização das imagens originais (fig.4.9), após a aplicação da função acima descrita.

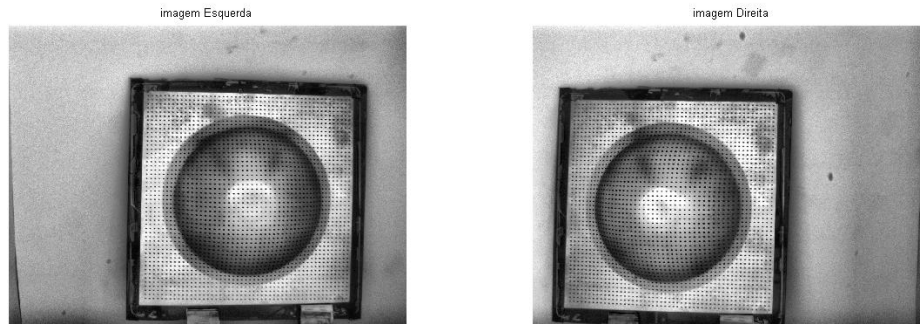


Figura 4.11: Par de imagens estéreo equalizadas

4.5.2 Binarização ou thresholding

Thresholding é um processo de segmentação de imagem. Este procedimento, tradicionalmente admite um nível de intensidade. Acima deste nível de intensidade, os *pixels* passam a 1, abaixo deste valor, os *pixels* passam a 0. Embora seja uma função com elevada utilidade, é preciso ter em atenção para que este algoritmo não assuma valores indesejados.

Para aplicar filtros de *threshold*, o Matlab usualmente segue-se pelo método de Otsu. O algoritmo assume que a imagem contém duas classes de *pixels*, seguindo um histograma bi-modal, e então calcula o valor ótimo de *threshold* de separação das duas classes. No entanto, dada as exigências deste procedimento, para certificar que todos os *pixels* do padrão assumiam o valor correto, foi utilizada uma função de *threshold* mais robusta. A função local adaptativa Bradley [36][37], providencia um *threshold* local utilizando o integral da imagem, isto é, avalia as variações de iluminação. Na figura seguinte podemos visionar o efeito do Bradley local *threshold* (fig.4.12).

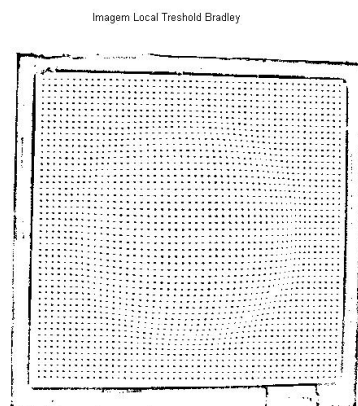


Figura 4.12: Local threshold Bradley

A função Bradley aceita como entrada o tamanho da janela, pelo que, ao correr o filtro em cada *pixel*, analisa e calcula o *threshold* numa vizinhança igual ao tamanho da janela utilizada.

4.5.3 Operações morfológicas

Seja no uso do padrão de pontos, seja no uso de padrão de linhas, a marcação destes é registada em vários *pixels* na mesma imagem. Isto é, por exemplo, para a marcação de um dado ponto único do padrão na chapa metálica através do Robot Fanuc M-6iB, esse mesmo ponto é retratado através de um conjunto ou região de *pixels* numa imagem. As operações morfológicas são ferramentas prestáveis no que toca a tratamento de formas e objetos ou descrição de regiões. Funções derivadas do comando 'bwmorph' tais como *open*, *close*, *erode*, ou *thin* foram repetidamente recorridas, para tratamento de regiões. Na ótica da eliminação do ruído, uma utilização adequada dos operadores morfológicos pode ser bem sucedida. A exemplo disto, observe-se a figura 4.13.

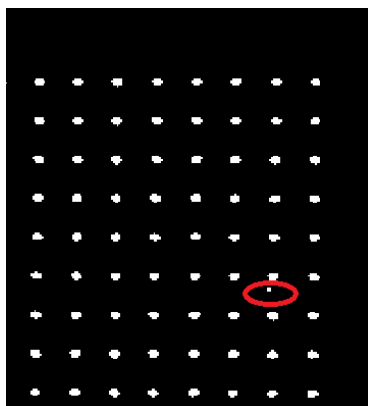


Figura 4.13: Imagem com ruído

Como se pode verificar, na figura 4.13 temos a presença de algum ruído indesejável assinalado a vermelho. Utilizando a operação *imclose*, o ruído vai-se aglomerar com os *pixels* de um ponto do padrão (fig. 4.14).

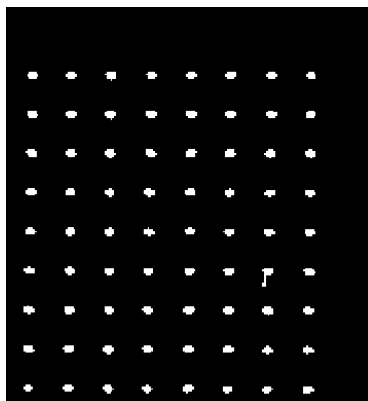


Figura 4.14: Imagem com ruído aglomerado

Posteriormente, efetuando uma procura das regiões com uma área superior a uma 'média', é detetado o ruído que formou uma região juntamente com os *pixels* de um ponto do padrão. Removendo esta região, elimina-se o ruído (fig.4.15).

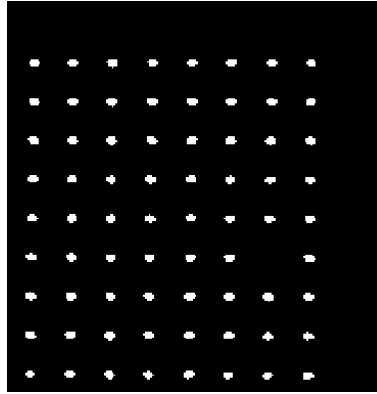


Figura 4.15: Imagem sem ruído

Embora também tenha sido eliminado um aglomerado de *pixels* de interesse, ele poderá ser recuperado mais tarde, com o uso do algoritmo de reconstrução dos pontos em falta.

4.5.4 Selecionar região de interesse (ROI)

Para facilitar tanto a compreensão, como o tratamento e manuseamento de imagens, é proveitoso selecionar uma região ou área de interesse (ROI - Region of interest). Para este efeito, o Matlab dispõe de variadas máscaras de diferentes geometrias para as várias situações. Dado que existem diferentes *baselines* e então o objeto em estudo não apresenta sempre a mesma orientação nas imagens, foi utilizada a função 'impoly', que permite definir manualmente a ROI como exemplificado na fig.4.16 a azul.

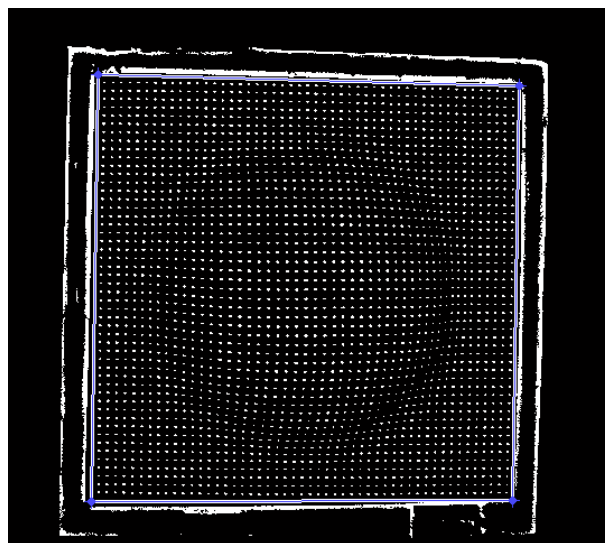


Figura 4.16: Máscara de região de interesse (ROI)

Obtendo assim a região de interesse apresentada na figura 4.17

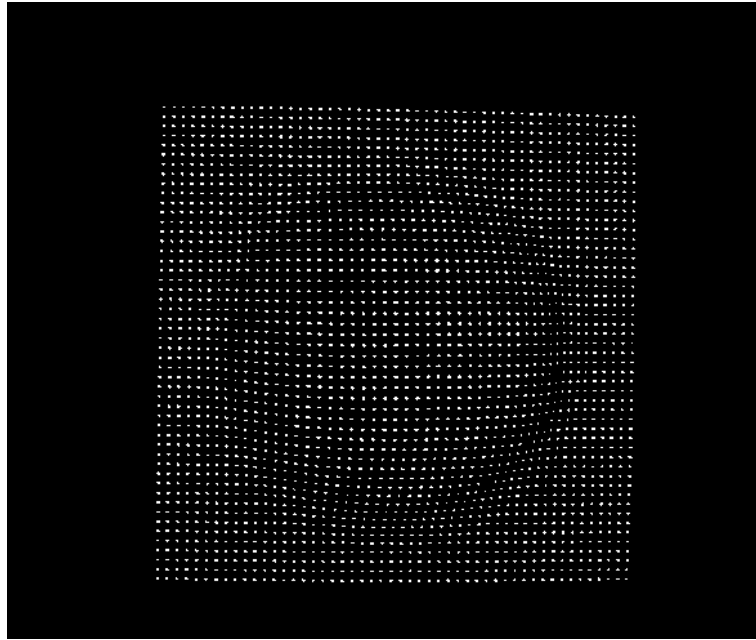


Figura 4.17: Região de interesse (ROI)

4.5.5 Procura de pontos em falta na grelha

Por vezes, ou porque algum ponto na chapa não é visível em ambas as câmaras estéreo ou porque o tratamento de imagens obrigou a eliminar uma região conjuntamente com ruído, pode-se dar conta de alguns pontos em falta no padrão (fig.4.18).

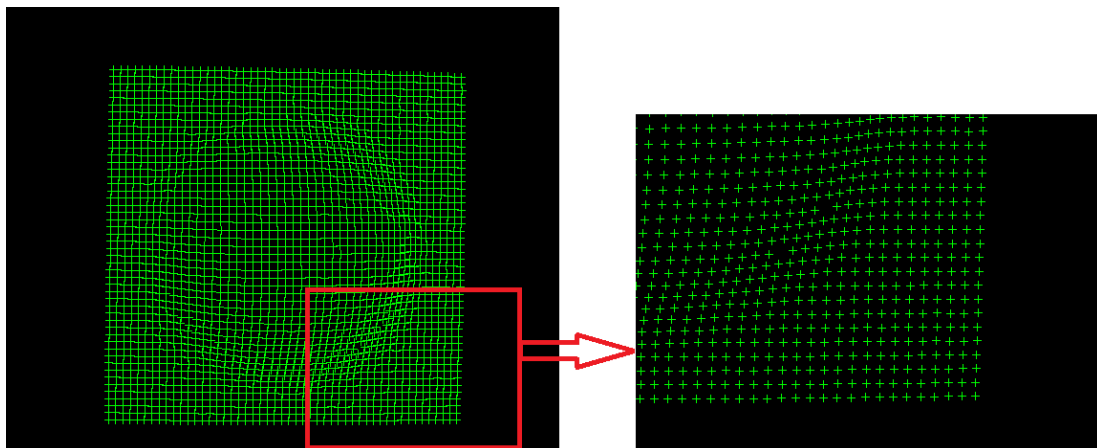


Figura 4.18: Pontos em falta no padrão da imagem esquerda

De modo a detetar os ditos pontos em falta, foi elaborado um algoritmo. Este algoritmo, pode ser dividido em duas partes: inicialmente faz uma ordenação sequencial dos pontos, fig.4.19, atribuindo a cada ponto um índice i e ao ponto seguinte um índice $i+1$.

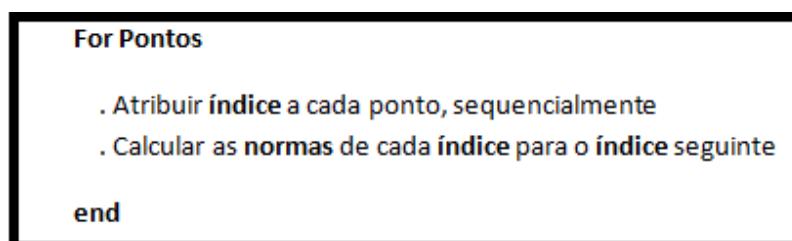


Figura 4.19: Algoritmo procura pontos em falta - 1ª parte

O algoritmo enunciado origina uma ordenação cujo resultado final se pode observar na figura representativa 4.20.

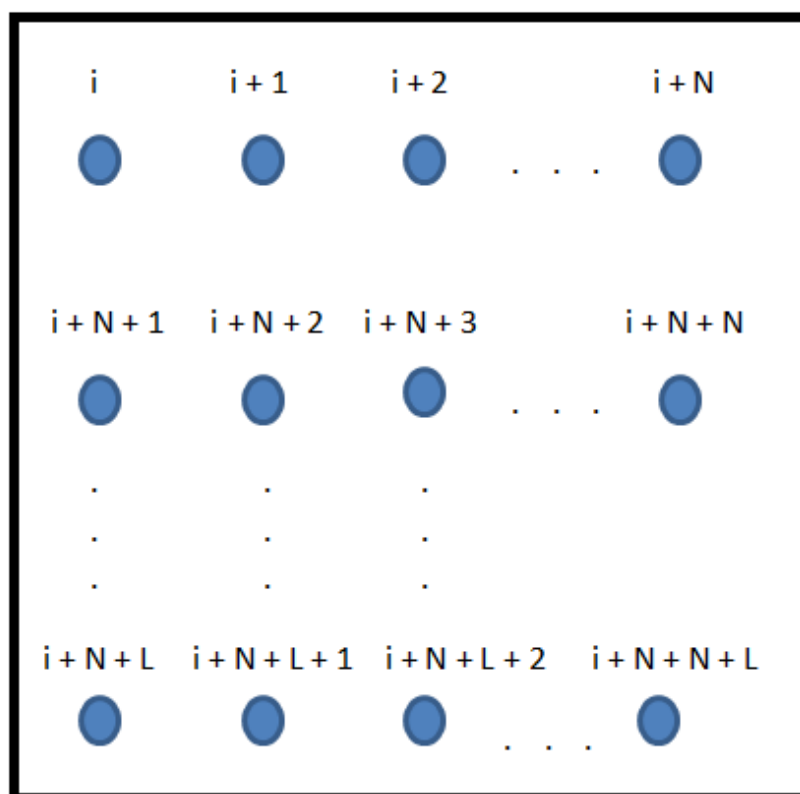


Figura 4.20: Sequência de pontos - Imagem representativa

Após esta ordenação, temos a segunda parte do algoritmo (fig.4.21) de procura de pontos em falta: Para cada ponto de índice i , o algoritmo calcula uma média das normas locais (norma dos pontos mais próximos do ponto em questão para o ponto seguinte). Posteriormente, se a norma desse mesmo ponto i para o ponto $i+1$ (calculada na 1ª parte do algoritmo) for maior do que a norma média local multiplicada por um coeficiente dado, então é detectado um ponto em falta. A figura 4.21 representa os passos referidos da 2ª parte do algoritmo enunciado.

```

For cada índice
    . Calcular a norma média local
    For cada norma
        if alguma norma > coeficiente segurança x norma média local
            . Detetado Ponto em falta
        end
    end
end

```

Figura 4.21: Algoritmo procura pontos em falta - 2ª parte

4.5.6 Reconstrução da grelha

De modo a que a situação dos pontos em falta não afete a correspondência, foi também desenvolvida uma função de reconstrução dos mesmos, para que se obtenha sempre o mesmo número de pontos na imagem obtida pela câmara da direita e pela imagem obtida pela câmara da esquerda. Após a procura e deteção dos pontos em falta, esta função avalia a distância vazia, ou seja, o espaço onde há pontos em falta. De seguida, utilizando a posição dos pontos locais, os pontos em falta são reconstruídos, por interpolação. Na figura 4.22 pode-se observar os pontos reconstruídos a partir da figura 4.18.

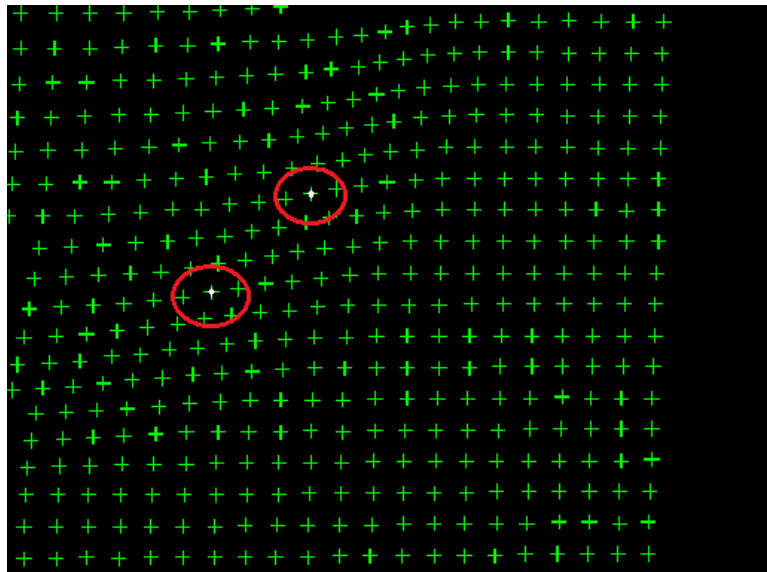


Figura 4.22: Pontos em falta reconstruídos (zoomed)

4.6 Cálculo estéreo

4.6.1 Princípio de funcionamento

Os sistemas estéreo baseiam-se no funcionamento do sistema visual humano, obtendo informações tridimensionais a partir de duas imagens, a chamada visão binocular (estereoscópica). Cada olho projeta na retina uma imagem que é transmitida para o cérebro, onde são obtidas as informações tridimensionais a partir da disparidade entre imagens [38].

Sabendo a diferença de posição entre duas câmaras (*baseline*) e as suas propriedades óticas, é possível estimar a localização de objetos em profundidade num determinado cenário. O princípio consiste em aplicar a diferença de coordenadas de duas imagens, sabendo que quanto mais próximo um determinado objeto estiver do sistema estéreo, maior será a diferença em *pixels* nas duas imagens obtidas, ou seja, maior será a disparidade [33].

4.6.2 Correspondência

A correspondência estéreo é o processo de determinação de semelhanças entre duas imagens para o cálculo da disparidade. Para um dado ponto no espaço tridimensional visível pelas duas câmaras estéreo, existem duas imagens onde esse mesmo ponto está representado, mas com coordenadas diferentes em cada uma delas, devido à diferença de posição entre as câmaras. Para melhor compreensão, atente-se na figura 4.23. Os pontos assinalados a vermelho no par de imagens estéreo indicam um par de pontos correspondentes.

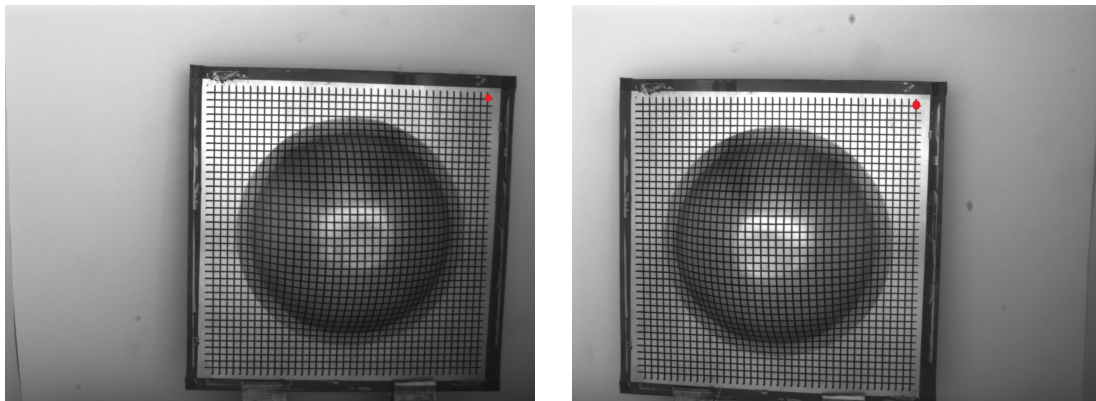


Figura 4.23: Pontos correspondentes

Existem vários algoritmos de cálculo de correspondência, como por exemplo o DIC (digital image correlation). Basicamente, o algoritmo de DIC avalia, para um dado pixel, os níveis de intensidade da vizinhança e procura, na imagem par, o ponto que tem um valor mais próximo.

No entanto, no âmbito deste trabalho, como estamos perante um padrão regular e a vizinhança é sempre muito semelhante, foi desenvolvido um novo algoritmo baseado na sequenciação de pontos e na posição relativa de pontos. Dado que o padrão de pontos gravado na chapa está inicialmente ordenado (fig.4.20), mesmo depois de deformado é fácil prever e ordenar os pontos numa determinada sequência.

Ainda, como já foi referido, visto que o sistema desenvolvido procura os pontos em falta e reconstrói-os, estaremos sempre perante um número de pontos igual no par de imagens estéreo, pelo que este processo se verificou eficaz e de rápido processamento. Utilizando o mesmo algoritmo de ordenação dos pontos equivalente nas duas imagens, podemos concluir que o ponto número 1 na imagem da esquerda corresponde ao ponto número 1 da imagem da direita, e assim sucessivamente.

4.6.3 Triangulação

Triangulação é o processo utilizado na estereoscopia para estimar a 3ª dimensão dos pontos. Por outras palavras, sabendo as coordenadas 2D de um par de pontos correspondentes nas respetivas imagens esquerda/direita, o procedimento de triangulação permite calcular as coordenadas desse mesmo ponto no espaço tridimensional. Para um dado ponto projetado na imagem esquerda pela representação PL, existe uma projeção correspondente desse mesmo ponto na imagem direita como PR e consequentemente uma localização real P no referencial mundo. A triangulação permite calcular, através das coordenadas PL e PR, a profundidade do ponto P.

Para se obter a reconstrução tridimensional do cenário obtido por um sensor estéreo, é necessário garantir uma geometria semelhante à representada na figura 4.24 de forma a aplicar o algoritmo de Bouguet [39], que consiste na reprojeção de pontos para o espaço tridimensional.

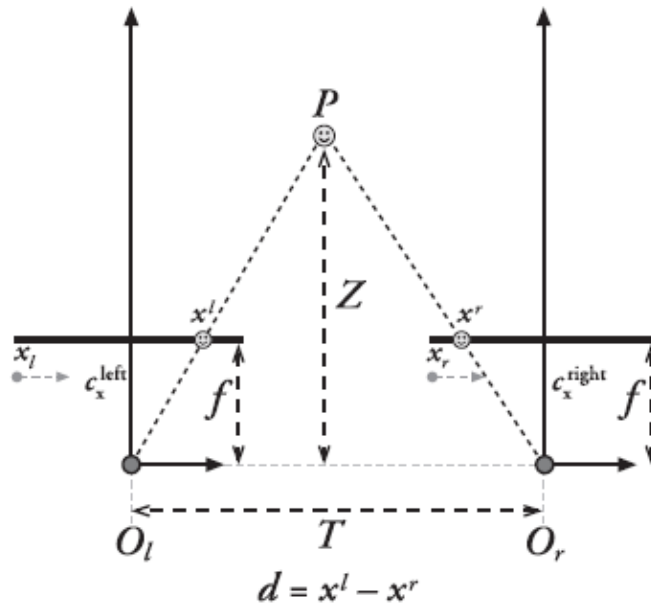


Figura 4.24: Triangulação estéreo [39]

A figura 4.24 representa o modelo *pinhole*, semelhante à representação da fig.4.5, generalizado para câmaras estéreo. Para compreender a triangulação envolvida no cálculo da reprojeção, considere-se que é possível encontrar um objeto qualquer P no mundo físico nas duas câmaras do sensor estéreo em que as suas coordenadas no eixo x correspondem

a x_l e x_r para a imagem da esquerda e imagem da direita respectivamente (fig.4.24). Desta forma, a disparidade é dada por $d = x_l - x_r$, assumindo a geometria epipolar das imagens, e pode-se efetuar a triangulação das coordenadas para estimar a profundidade Z segundo a equação 4.4 [39].

$$\frac{T - (x_l - x_r)}{Z - f} = \frac{T}{Z} \Leftrightarrow Z = \frac{fT}{x_l - x_r} \quad (4.4)$$

Uma vez que a profundidade Z é inversamente proporcional à disparidade d , cria-se uma relação não linear entre estes dois termos. Quando a disparidade é próxima de zero, pequenas diferenças na disparidade correspondem a grandes diferenças na profundidade. Por outro lado, quando a disparidade é elevada, pequenas diferenças de disparidade não alteram muito a profundidade. A principal consequência deste facto é que os sistemas de visão estéreo apenas apresentam resolução de profundidade para objetos relativamente perto do sensor [39] (fig.4.25).

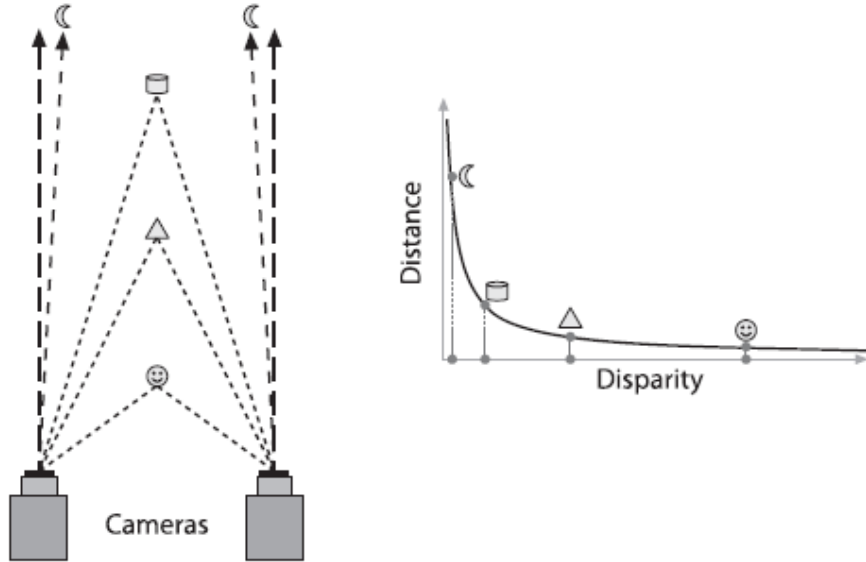


Figura 4.25: Relação Disparidade vs Profundidade [39]

Para realizar este processo, foi utilizada a função *stereo triangulation*, disponível pela *Camera Calibration Toolbox for Matlab®*, já anteriormente utilizada no processo de calibração das câmaras. Esta função utiliza os dados adquiridos na calibração e a informação das coordenadas 2D dos pontos relativamente às imagens do par estéreo para calcular a matriz das coordenadas tridimensionais dos pontos.

4.6.4 Reconstrução tridimensional

Concluindo a triangulação, foi obtida a matriz $N_{\text{pontos} \times 3_{\text{colunas}}}$, que representam as coordenadas (x,y,z) de cada um dos pontos da grelha. Estes pontos graficamente formam a nuvem de pontos do modelo tridimensional da chapa metálica (fig.4.26).

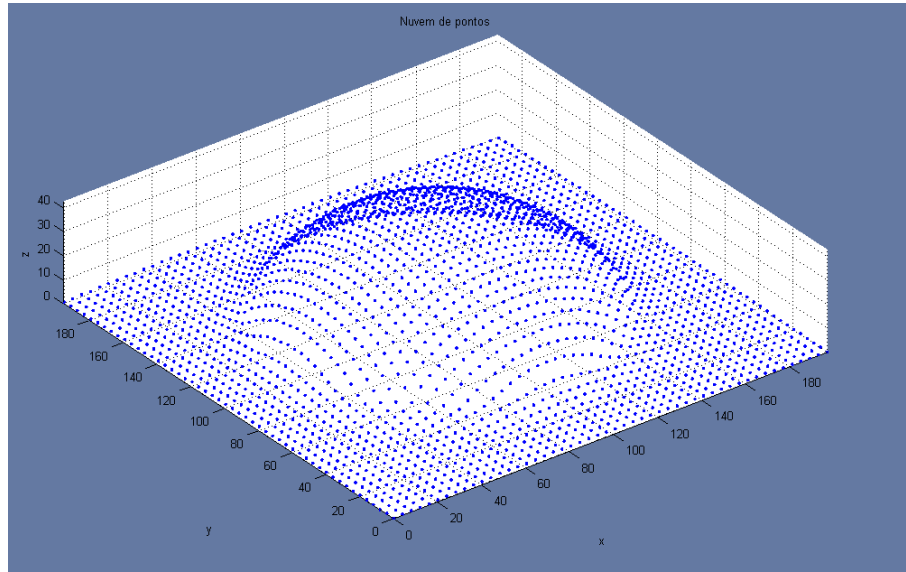


Figura 4.26: Nuvem de pontos - Exemplo de caso de estudo (mm)

De forma a reconstruir a superfície da chapa metálica deformada a partir da nuvem de pontos, pode-se utilizar tanto a função fornecida pelo Matlab 'patch', ou a ferramenta cftool, como a função disponível no fórum Mathworks 'gridfit'. Ambas interpolam uma superfície tangente aos pontos obtidos, de forma a obter a reconstrução tridimensional. A figura em baixo (fig.4.27) exemplifica uma reconstrução utilizando a ferramenta cftool.

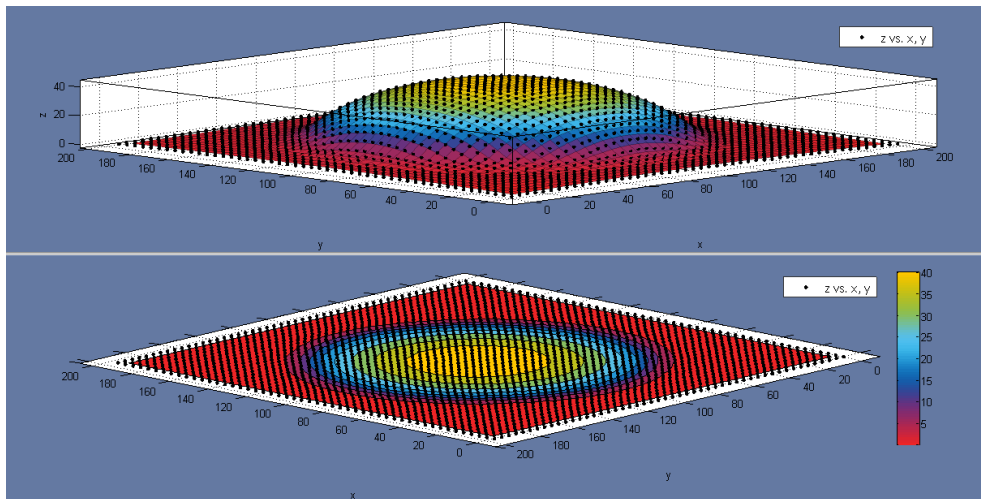


Figura 4.27: Exemplar de reconstrução utilizando Matlab - cftool (mm)

4.7 Cálculo de deformações

Concluindo a fase de reconstrução do modelo da chapa 3D, é necessário calcular as deformações presentes na chapa metálica.

A deformação é, na sua definição mais básica, o alongamento de um segmento de reta por unidade de comprimento (expressão 4.5).

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.5)$$

Logo, para o cálculo das deformações, é necessário criar conexões entre os pontos ou nós da malha, formando segmentos de reta. Por este motivo, os pontos pertencentes à nuvem de pontos são conectados formando quadrados (fig. 5.19).

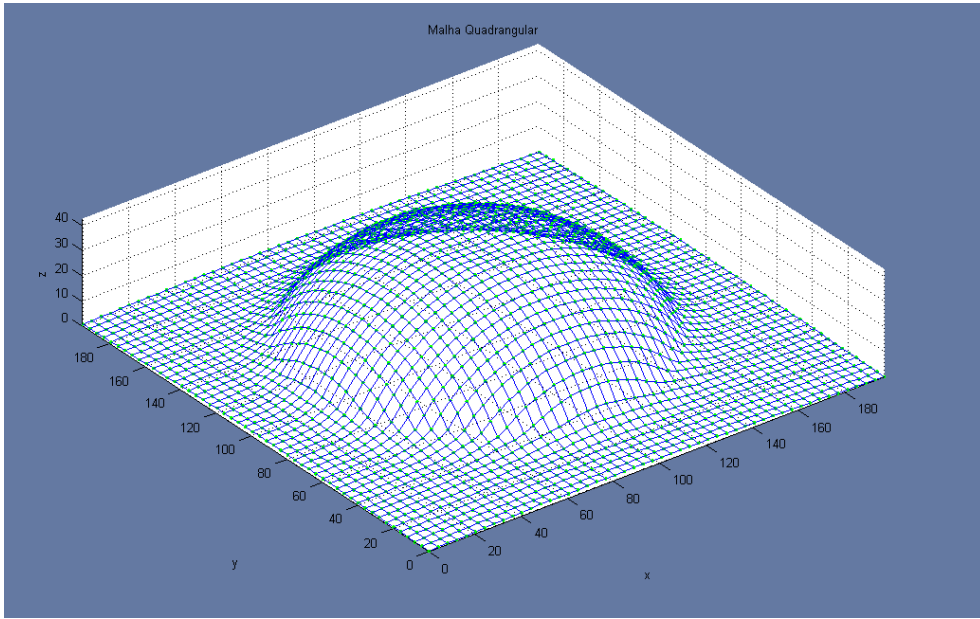


Figura 4.28: Malha quadrangular (mm)

Visto que inicialmente a chapa metálica continha um padrão regular, basta então calcular a deformação do padrão final em relação ao padrão inicial.

4.7.1 Metodologia de Vogel e Lee

Vogel e Lee propuseram uma metodologia de cálculo de deformações utilizando triângulos. Para um dado triângulo recto não deformado, alinhado com o sistema de coordenadas, temos o mesmo triângulo deformado, numa posição arbitrária no espaço (fig.4.29)[40].

Assim, o tensor de deformação Cauchy-Green C pode ser calculado pela fórmula [9]:

$$C_{11} = \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}{D^2} \quad (4.6)$$

$$C_{22} = \frac{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2}{D^2} \quad (4.7)$$

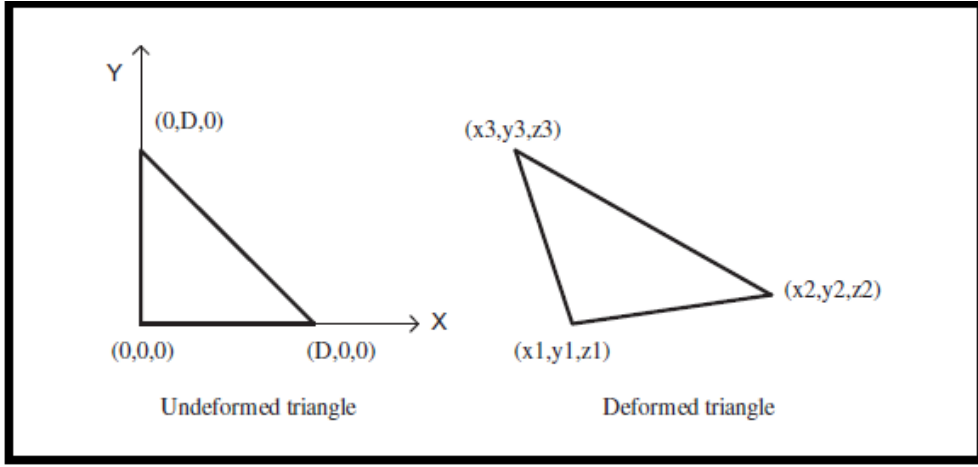


Figura 4.29: Deformação triângulo [9]

$$C_{12} = \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 + (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2}{2D^2} - \frac{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2}{2D^2} \quad (4.8)$$

Sendo o valor de D o valor do lado do triângulo inicial não deformado. De seguida as deformações de Lagrange, E , podem ser calculadas a partir do tensor C através da equação 4.9 [9].

$$C = 1 + 2E \quad (4.9)$$

tem-se então:

$$E_{11} = \frac{C_{11} - 1}{2} = \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - D^2}{2D^2} \quad (4.10)$$

$$E_{22} = \frac{C_{22} - 1}{2} = \frac{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2 - D^2}{2D^2} \quad (4.11)$$

$$E_{12} = \frac{C_{12} - 1}{2} = \frac{(x_2 - x_1)(x_3 - x_1) + (y_2 - y_1)(y_3 - y_1) + (z_2 - z_1)(z_3 - z_1)}{2D^2} \quad (4.12)$$

A fim de encontrar os valores de deformações principais, foi utilizado o círculo de Mohr. O círculo de Mohr é um método gráfico bidimensional de resolução de um estado de tensões como mostra a figura 4.30 [41].

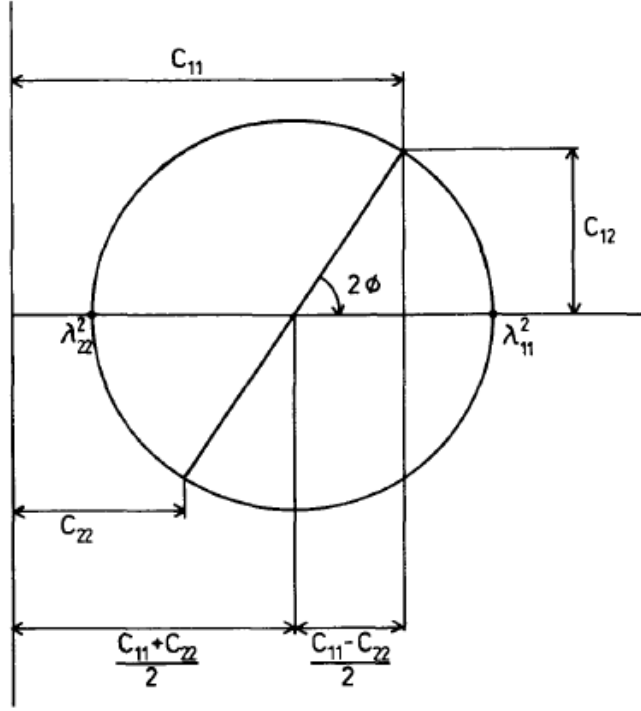


Figura 4.30: Mohr Circle [41]

$$Average = \frac{E11 + E22}{2} \quad (4.13)$$

$$Radius = \sqrt{(E12)^2 + \left[\frac{E11 - E22}{2} \right]^2} \quad (4.14)$$

Através da análise do círculo de Mohr, calculam-se as deformações principais de Lagrange:

$$Emin, max = Average \pm Radius \quad (4.15)$$

ou, mais precisamente,

$$Emin, max = \frac{E11 + E22}{2} \pm \sqrt{(E12)^2 + \left[\frac{E11 - E22}{2} \right]^2} \quad (4.16)$$

Finalmente, determinam-se as tensões verdadeiras e o ângulo de orientação maior para cada triângulo:

$$\varepsilon_{minor} = \frac{1}{2} \ln(1 + 2Emin) \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_{major} = \frac{1}{2} \ln(1 + 2E_{max}) \quad (4.18)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2E_{12}}{E_{11} - E_{22}} \right) \quad (4.19)$$

Após a obtenção dos valores das deformações verdadeiras para cada triângulo, de forma a quantificar a deformação num determinado nó da malha, deve-se fazer a média de cada um dos triângulos adjacentes a esse nó.

Adicionalmente, com o intuito de diminuir alguns erros de medição de deformações, os nós da malha que se situam nas margens da peça em estudo, são considerados de maneira distinta: já que estes pontos não sofrem deformação, e os eventuais valores baixos de deformações que se verificam são consequência de erros estéreos, então foram aproximados para zero. A figura 4.31 identifica a vermelho os nós da malha que foram considerados com este último parâmetro.

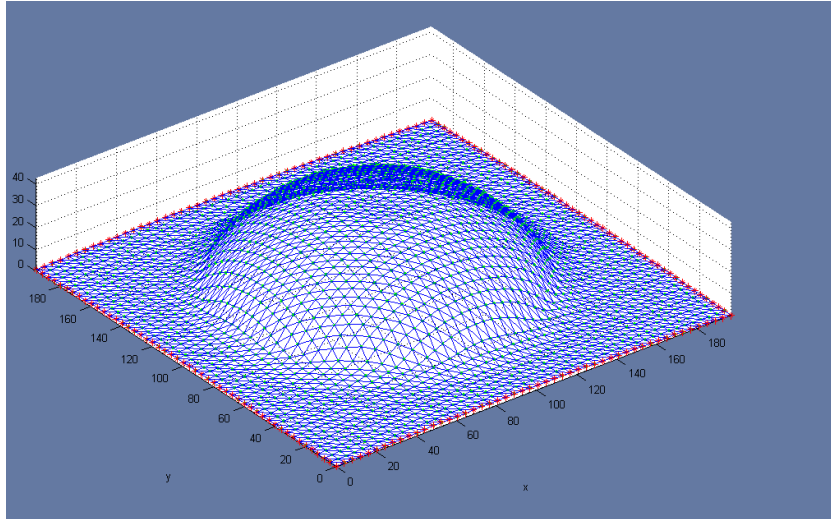


Figura 4.31: Nós da margem da malha

Capítulo 5

Casos de Estudo

5.1 Ensaios realizados

Neste capítulo serão abordados os casos de estudo realizados ao longo deste trabalho. Para facilitar a sua leitura, os casos de estudo foram divididos em duas categorias consoante o padrão utilizado: padrão de pontos e padrão de linhas. No organograma apresentado na figura seguinte (fig.5.1) pode-se observar uma representação esquemática dos ensaios realizados utilizando o primeiro padrão destacado.

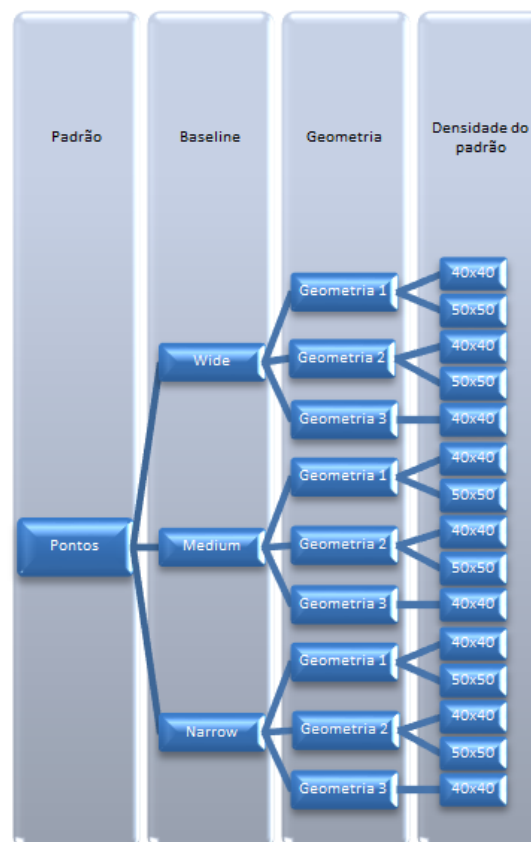


Figura 5.1: Organograma ensaios - Padrão de pontos

Pela análise da fig.5.1, e resumindo, para este padrão foram realizados ensaios em 3 *baselines* distintos: *wide* (ou amplo), *medium* (ou médio) e *narrow* (ou curto). Para cada uma destas distâncias entre as câmaras, foram realizados ensaios utilizando 3 geometrias diferentes, G1, G2 e G3. Ainda, para cada uma das geometrias G1 e G2, foram realizados ensaios com densidades de padrão distintas. Contabilizando, foram então estudados 15 ensaios nestas condições.

Apesar dos últimos ensaios terem correspondido às expectativas, adicionalmente foram realizados casos de estudo utilizando o padrão alternativo das linhas. No organograma apresentado na figura seguinte (fig.5.2) pode-se observar uma representação esquemática dos ensaios realizados utilizando este padrão alternativo.

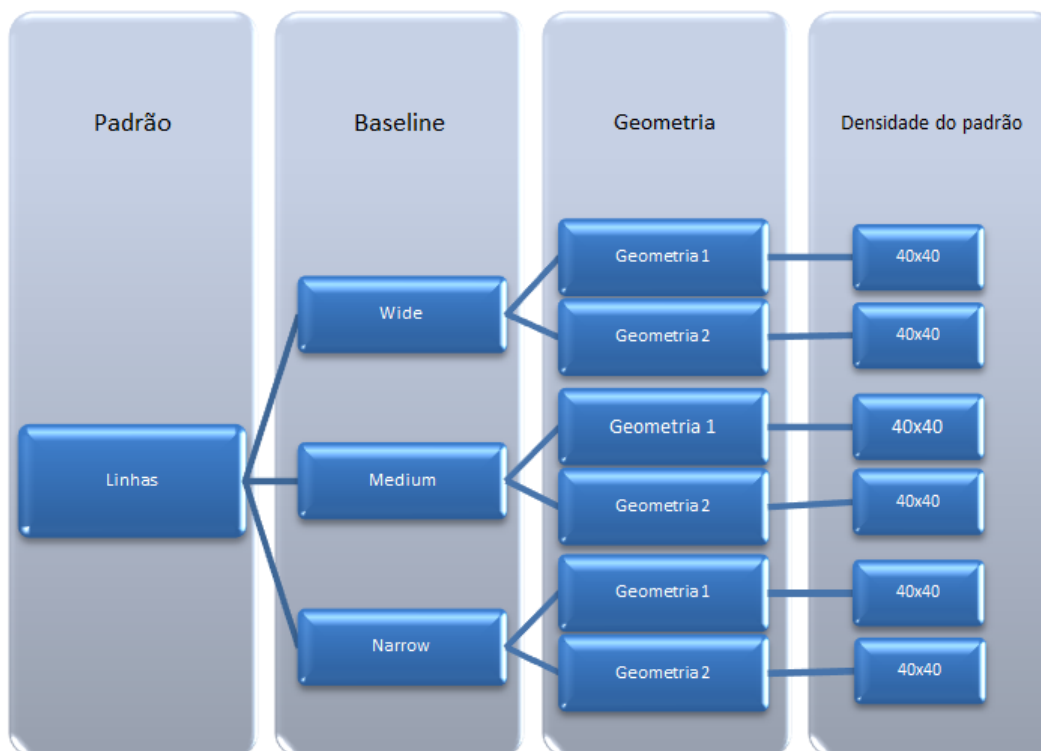


Figura 5.2: Organograma ensaios - Padrão de linhas

Atente-se agora no organograma da fig.5.2. Tal como no primeiro padrão, foram realizados ensaios para 3 *baselines* distintos. Foram ainda utilizadas as geometrias G1 e G2 para cada uma destas distâncias, de forma a garantir a funcionalidade deste padrão. No entanto, dado que a densidade do padrão já havia sido testada anteriormente, não foi necessário repetir os ensaios para densidades distintas.

Concluindo, pela análise das 2 representações esquemáticas (fig.5.1 e fig.5.2), foram efectuados 21 ensaios no total. A figura que se segue em baixo (fig.5.3) pretende representar esquematicamente o conjunto de todos os casos de estudo ao nível da reconstrução tridimensional. A estruturação deste último organograma foi previamente planeada, de forma a poder comparar todos os critérios inerentes à reconstrução tridimensional. Deste modo, é possível qualificar tanto o *baseline*, como o padrão, como a densidade do padrão ou até a geometria utilizada relativamente à qualidade da modelação 3D.

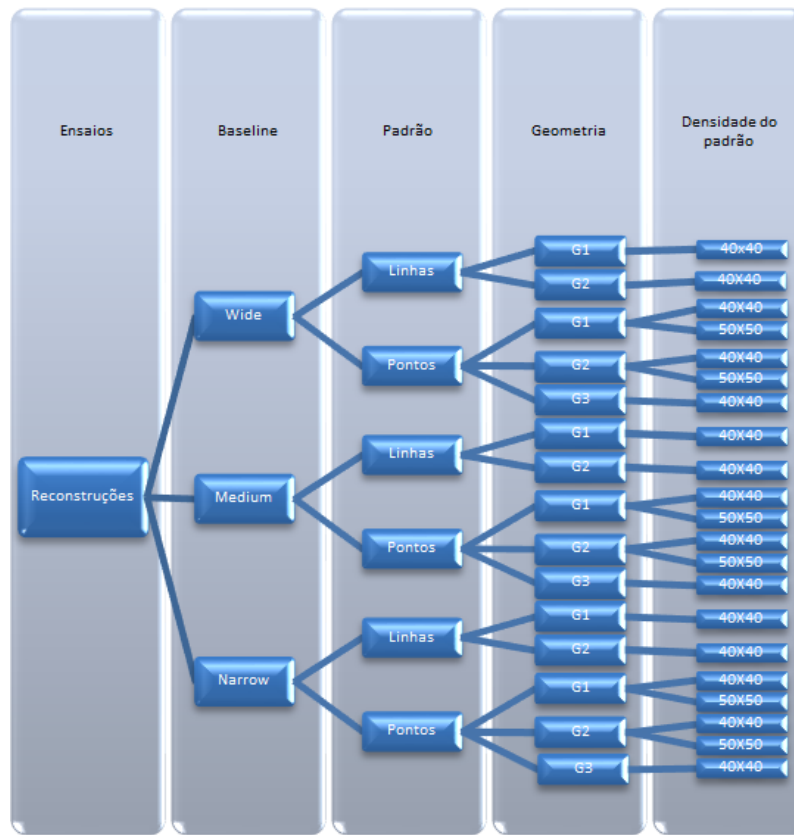


Figura 5.3: Organograma de ensaios tridimensionais

5.1.1 Baselines

A distância entre as câmaras, ou *baseline*, é um dos fatores que mais afeta a precisão da reconstrução 3D. No âmbito deste trabalho foram estudadas 3 distâncias entre câmaras distintas.

- *Baseline Wide*: O *baseline wide*, ou baseline amplo, implica uma distância relativa entre as câmaras grande (fig.5.4).



Figura 5.4: *Baseline Wide*

- *Baseline Medium*: O *baseline medium*, ou baseline médio, implica uma distância relativa entre as câmaras razoável (fig.5.5).



Figura 5.5: *Baseline Medium*

- *Baseline Narrow*: O *baseline narrow*, ou baseline curto, implica uma distância relativa entre as câmaras pequena (fig.5.6).



Figura 5.6: *Baseline Narrow*

A utilização de um *baseline* maior torna-se vantajoso quando se pretende reconhecer propriedades do ambiente num alcance de profundidade mais elevado e obter cenários mais distantes, uma vez que para um *baseline* fixo o erro de medição de disparidade aumenta quadraticamente com a profundidade [42].

5.1.2 Geometrias

Foram estudados os resultados provenientes de 3 deformações geométrias distintas. A geometria 1 - calota; a geometria 2 - pirâmide e a geometria 3 - tornado.

- G1 - Calota: A geometria 1 - calota é uma parte de uma superfície esférica. As figuras 5.7 e 5.8 representam, respetivamente, uma fotografia obtida por uma das câmaras do sistema estéreo ao objecto em questão e uma reconstrução aproximada do modelo 3D, com o auxílio da ferramenta "gridfit".

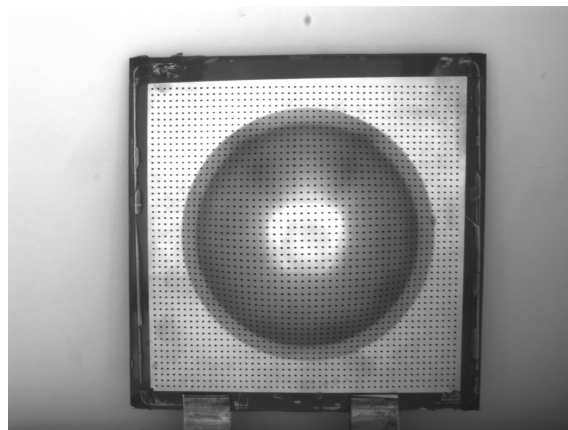


Figura 5.7: Fotografia calota

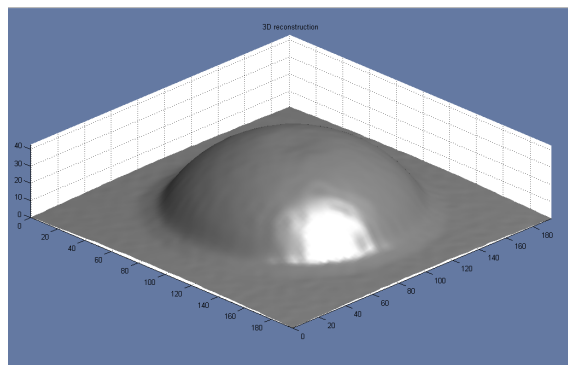


Figura 5.8: Modelo tridimensional calota

- G2 - Pirâmide: A geometria 2 - pirâmide é uma parte de uma superfície piramidal quadrangular. As figuras 5.9 e 5.10 representam, respectivamente, uma fotografia obtida por uma das câmaras do sistema estéreo ao objeto em questão e uma reconstrução aproximada do modelo 3D, com o auxílio da ferramenta "gridfit".

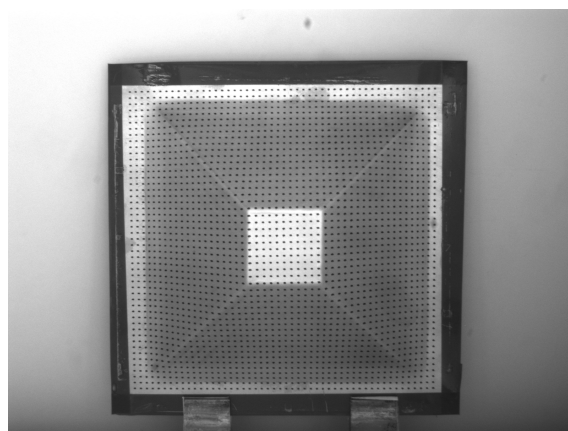


Figura 5.9: Fotografia pirâmide

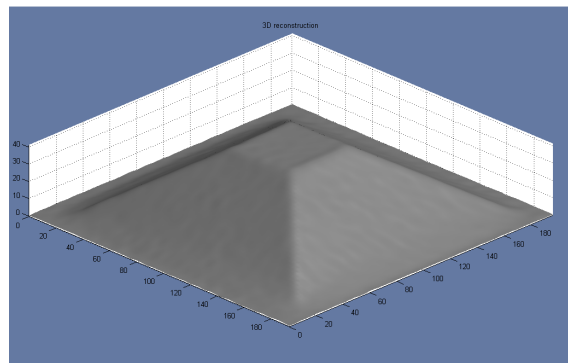


Figura 5.10: Modelo tridimensional pirâmide

- G3 - Tornado: A geometria 3 - tornado é uma superfície complexa, assimétrica. As figuras 5.11 e 5.12 representam, respetivamente, uma fotografia obtida por uma das câmaras do sistema estéreo ao objeto em questão e uma reconstrução aproximada do modelo 3D, com o auxílio da ferramenta "gridfit".

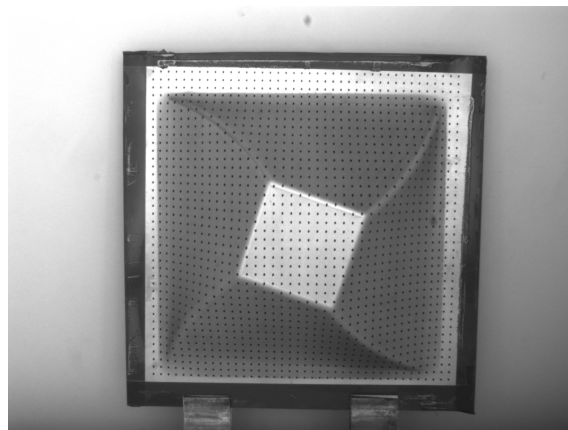


Figura 5.11: Fotografia tornado

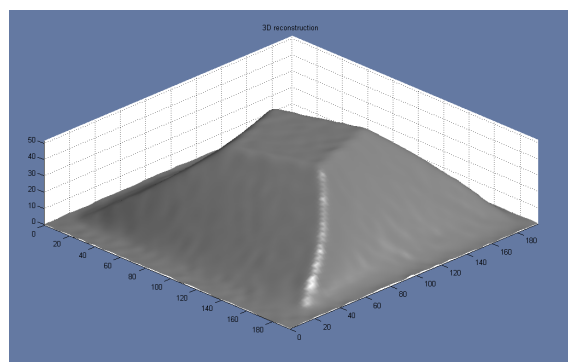


Figura 5.12: Modelo tridimensional tornado

5.1.3 Tipo de padrão

Embora o padrão de pontos tenha sido mais focado, o padrão de linhas também foi estudado. No primeiro caso referido, para o cálculo estéreo foram utilizados os centróides dos próprios pontos do padrão, enquanto que no último caso foram utilizados os centróides das interseções entre as linhas horizontais e verticais. A figura 5.13 apresenta um excerto de cada um dos padrões aplicados numa chapa metálica.

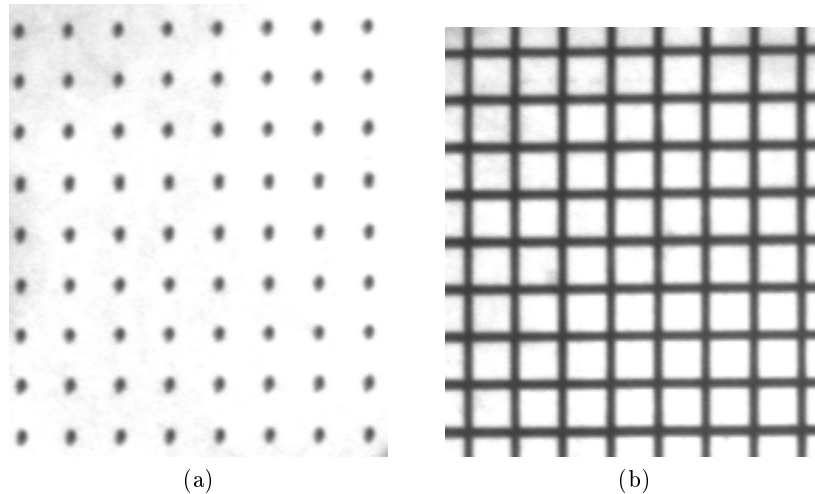


Figura 5.13: Na figura 5.13a) temos presente um excerto de um padrão de pontos aplicado numa chapa metálica. Na figura 5.13b) temos presente um excerto de um padrão de linhas aplicado numa chapa metálica

5.1.4 Densidade do padrão

Foram ainda realizados ensaios com diferentes densidades do padrão. As densidades utilizadas foram de 40x40 (1600 pontos ou intersecções) e 50x50 (2500 pontos ou intersecções). A primeira confere aos pontos ou intersecções uma distância entre si de 5mm. A segunda opção já torna a malha mais densa, pelo que confere aos pontos ou intersecções uma distância de 4mm entre si.

5.1.5 Câmaras utilizadas

Inicialmente foram adquiridas imagens com o sistema estéreo Bumblebee®XB3 da empresa Point Grey. Este sensor caracteriza-se essencialmente por possuir três câmaras. A utilização de várias câmaras no mesmo sensor tem como objetivo a simulação de um sistema de visão binocular, para fins de estereoscopia. O facto deste sensor possuir três câmaras permite combiná-las em dois pares distintos, ou seja, obter dois *baselines* (fig.5.14).

A principal vantagem na utilização deste dispositivo é a possibilidade de calcular a disparidade com dois pares de imagens. Dependendo da aplicação pretendida pode-se utilizar o *baseline* de 120mm ou de 240mm, ou se preferível em simultâneo [43]. Contudo, as câmaras Genie M1600 têm melhores características para a finalidade deste trabalho, pelo que foram utilizadas nos resultados finais.



Figura 5.14: Sistema estéreo Bumblebee XB3 [43]

5.2 Reconstruções tridimensionais (3D)

Para cada um dos ensaios realizados foi obtido o respetivo modelo tridimensional. No entanto, e apesar de estarem mais exemplares das reconstruções documentadas nos anexos (Apêndice D - Reconstruções), nesta secção irão apenas ser apresentados os resultados para alguns casos de estudo.

Através dos princípios de estereoscopia descritos anteriormente, obteve-se a posição tridimensional de cada um dos pontos do padrão (nuvem de pontos), tal como se pode verificar nas figuras seguintes (fig.5.15).

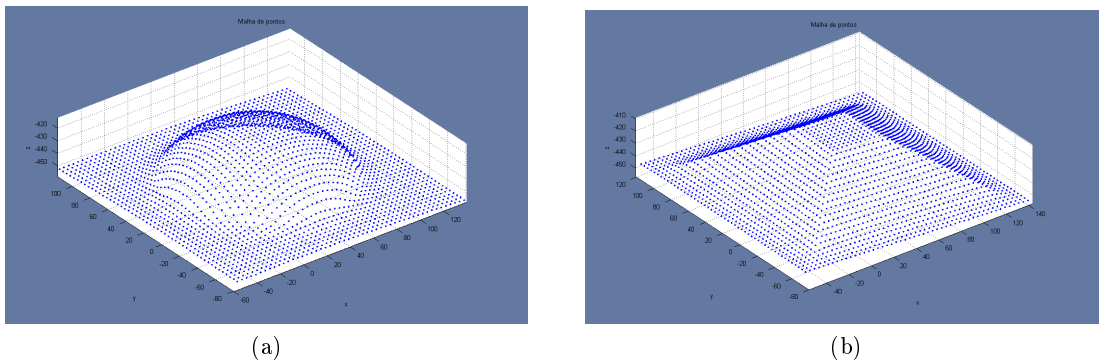


Figura 5.15: A figura 5.15a) mostra uma nuvem de pontos obtida pelo sistema para a geometria G1. A figura 5.15b) mostra uma nuvem de pontos obtida pelo sistema para a geometria G2 (unidades em mm).

Imediatamente, pelo visionamento da figura 5.15 temos a percepção total das peças deformadas. No entanto, principalmente por uma questão de apresentação, foram utilizadas várias ferramentas para reconstruir as próprias superfícies das chapas.

Para facilitar o entendimento da peça, a nuvem de pontos foi também rodada e transladada, de forma a ficar paralela com o sistema de coordenadas.

- **Gridfit:** Gridfit é uma ferramenta de modelação de superfícies, que utiliza a informação dos pontos para criar uma superfície que se aproxime dos pontos dados. Esta função utiliza extrapolação de pontos, ou seja, através dos pontos fornecidos, modela a superfície que mais se aproxime de todos os pontos, sem que tenha obrigatoriamente que intersectar exactamente em todos os pontos. Esta ferramenta

é útil para visualizar a suavidade da superfície modelada. O resultado obtido da modelação para a geometria G1 segundo esta função é o seguinte (fig.5.16):

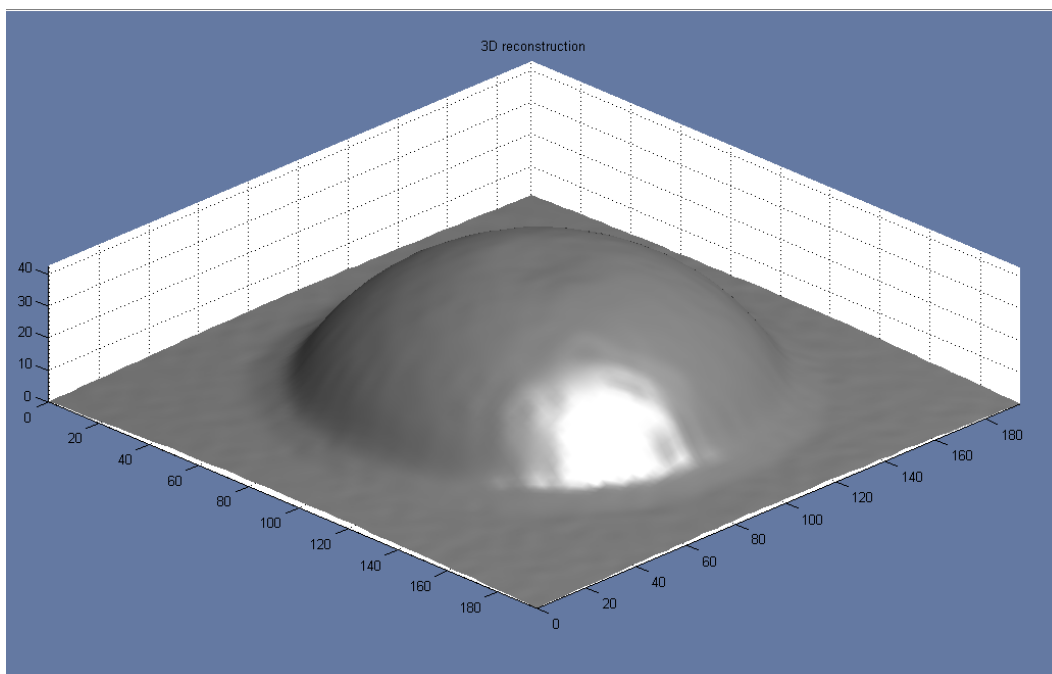


Figura 5.16: Exemplo de reconstrução tridimensional (Matlab - gridfit) (mm)

- Curve Fitting Tool: Curve Fitting Tool é uma ferramenta de modelação de superfícies, fornecida pelo Matlab, que faz uso da interpolação de pontos fornecidos. Esta ferramenta dispõe de várias funcionalidades para construir superfícies a partir de dados fornecidos. Para os casos de estudo em questão, foi utilizado a opção *interpolant* e a metodologia de interpolação *linear*. O resultado obtido da modelação para a geometria G1 segundo esta função é o seguinte (fig.5.17)

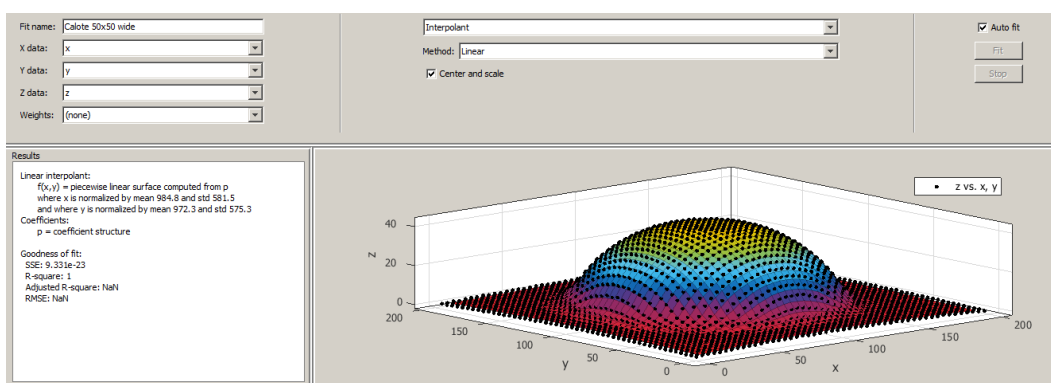


Figura 5.17: Exemplo de reconstrução tridimensional (Matlab - cftool) (mm)

Ainda, adicionando a opção *contour* é possível estudar a profundidade da peça por níveis. Na figura em baixo (fig.5.18) observa-se uma vista da peça projetada por camadas no plano xy, de acordo com a profundidade.

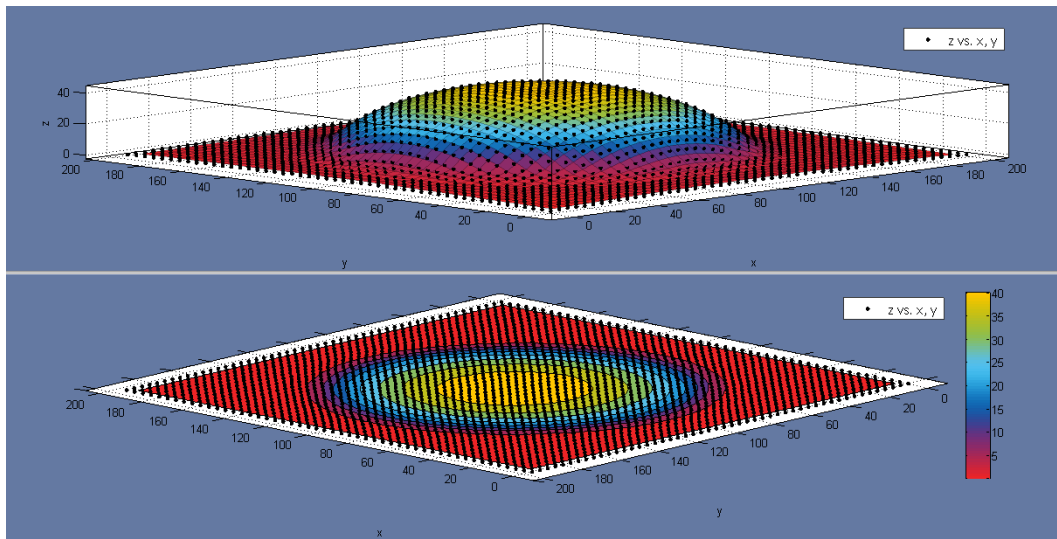


Figura 5.18: Exemplar de reconstrução tridimensional (Matlab - cftool contour) (mm)

5.3 Deformações

Um dos objetivos principais deste trabalho foi de desenvolver um sistema capaz de calcular, de forma automática, as deformações em processos de conformação de chapas metálicas. Para esse efeito, para cada um dos ensaios realizados, foram calculadas as deformações ao longo da chapa metálica e apresentados os resultados sob várias formas. Embora estes resultados estejam documentados nos anexos (Apêndice E - Major strains e Apêndice F - Minor strains), para facilitar a compreensão e leitura, nesta secção irão apenas ser apresentados alguns exemplares.

Com a formação da malha quadrangular (fig.5.19), são estipuladas conexões entre os pontos da malha. Posteriormente, Vogel e Lee propõem um método de cálculo de deformações para malhas quadrangulares.

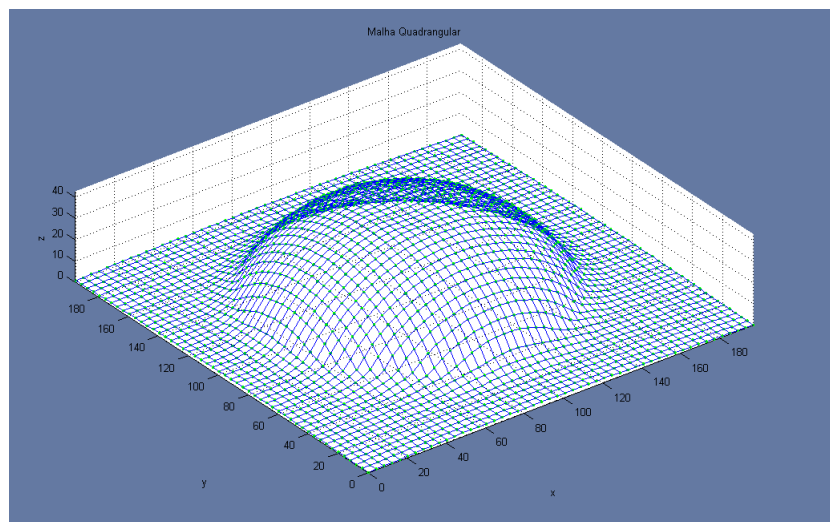


Figura 5.19: Malha quadrangular (mm)

5.3.1 Aplicação do método de Vogel e Lee

Após o processo de cálculo de deformações proposto por Vogel e Lee em cada triângulo (detalhado no Capítulo 3), é necessário quantificar a deformação aproximada em cada um dos nós. Para alcançar este objetivo foram utilizadas 2 casos de estudo:

Losângulos

Esta versão, a que chamaremos de V1, calcula as deformações para cada nó usando uma organização de triângulos em losângulos. Para cada nó, é utilizado um algoritmo que divide os quadrados envolventes, criando um losângulo, como é mostrado na figura 5.20. Posteriormente, pela média das deformações dos 4 triângulos pertencentes ao losângulo, são calculadas as deformações no nó em estudo.

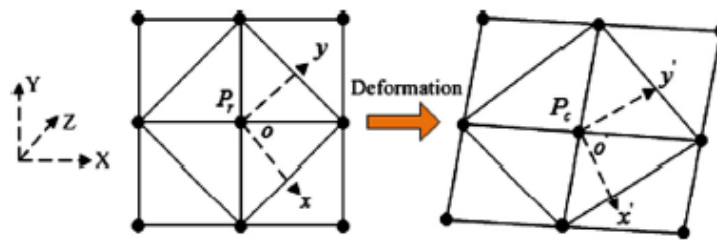


Figura 5.20: Organização da malha em losângulos

Diagonais

Esta versão, a que chamaremos de V2, calcula as deformações para cada nó utilizando uma organização de triângulos na diagonal, ou seja, divide-se cada quadrado da malha em dois triângulos, sempre com a mesma orientação. Para cada nó, é utilizada a informação de cada um dos 6 triângulos adjacentes a esse nó (figura 5.21).

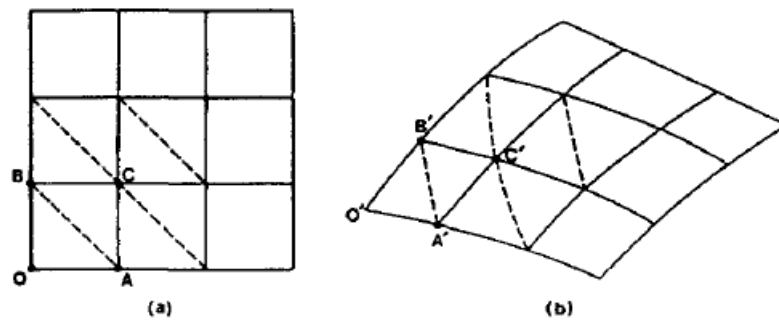


Figura 5.21: Organização da malha em diagonal

5.3.2 Análises de deformações

Como foi referido, foram calculadas as deformações verdadeiras, maior e menor, para cada um dos ensaios e para cada uma das metodologias de aplicação do método de Vogel e Lee. Embora o sistema desenvolvido permita também uma análise localizada para qualquer um dos nós (fig.5.22), foi adicionalmente utilizada a função "patch" para ter uma percepção global das deformações.

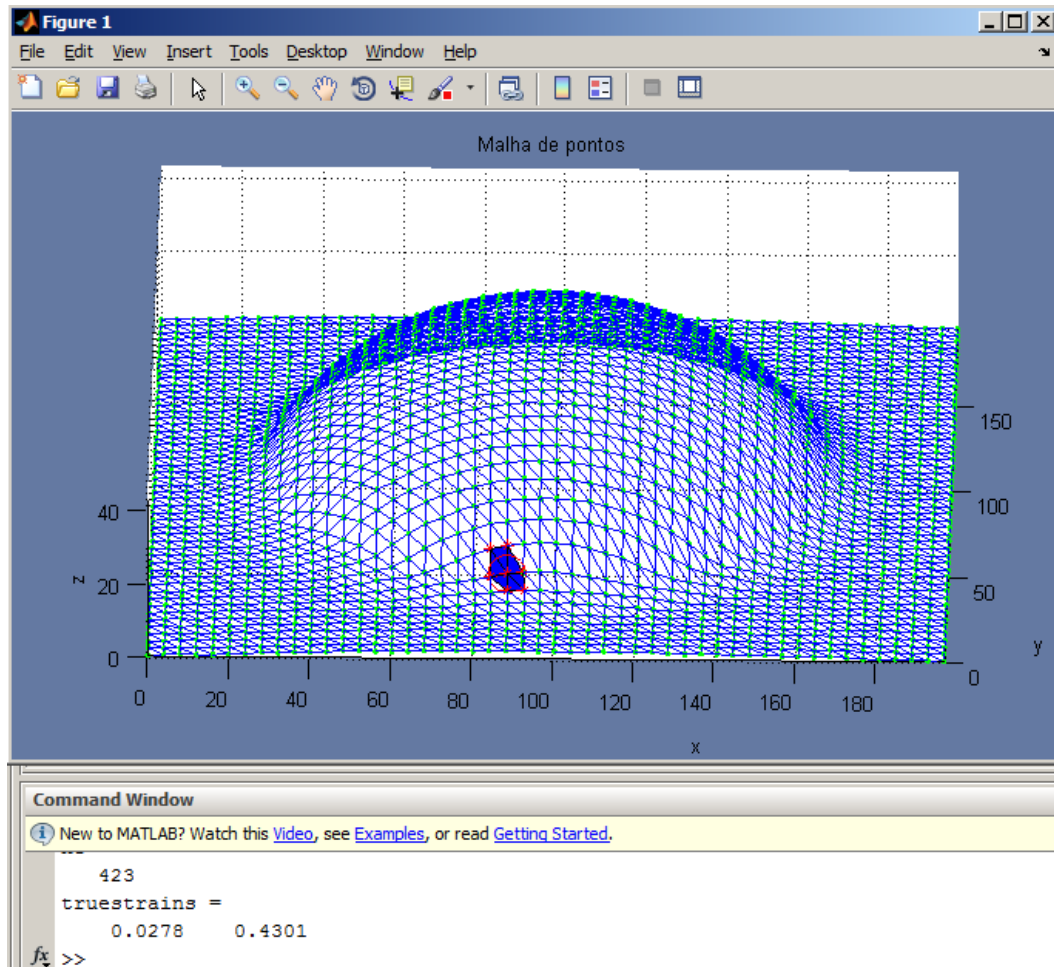


Figura 5.22: Caso de estudo de uma deformação local na geometria G1

Para a deformação local representada na figura 5.22, obteve-se os valores de deformações verdadeiras de 0.0278 e 0.4301, ambos em percentagem (%). Estes valores correspondem respectivamente à "minor strain" e "major strain".

A função "patch", disponível no Matlab, permite criar um *handle* gráfico de polígonos 2D, tal que, dado um vetor 'C' de deformações, preenche os polígonos com uma cor, consoante o valor do vetor. Por outras palavras, a função "patch" preenche os triângulos obtidos com cores, consoante o valor de deformação. Nas figuras seguintes (fig.5.23 e fig.5.24) podemos verificar alguns exemplares, para a geometria G1 utilizando a função enunciada consoante o valor de deformação.

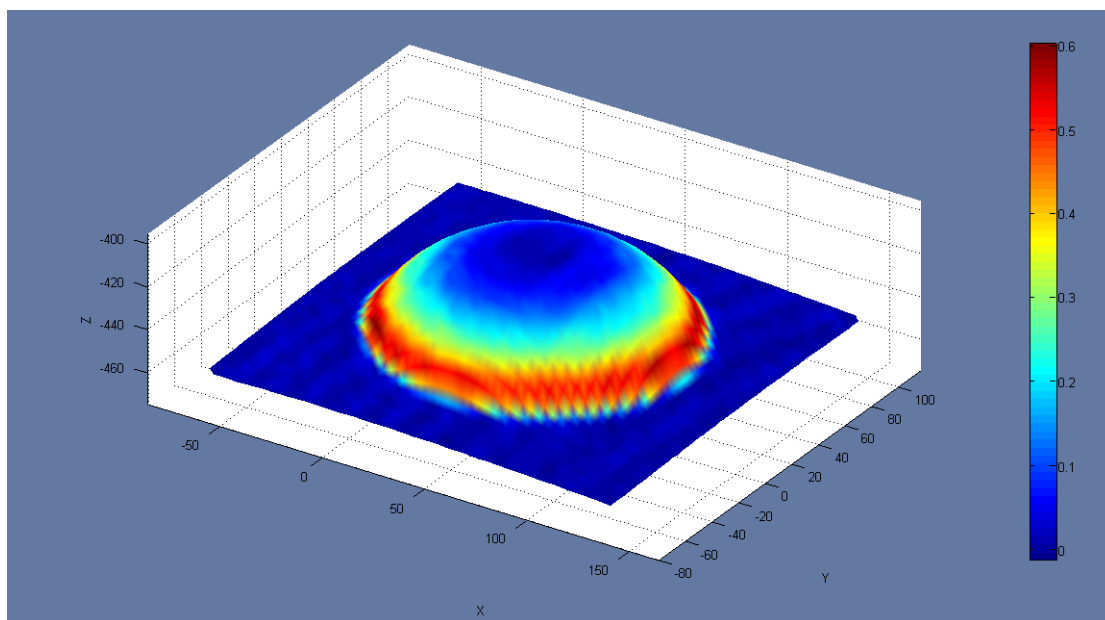


Figura 5.23: Caso de estudo de 'major strains' na geometria G1

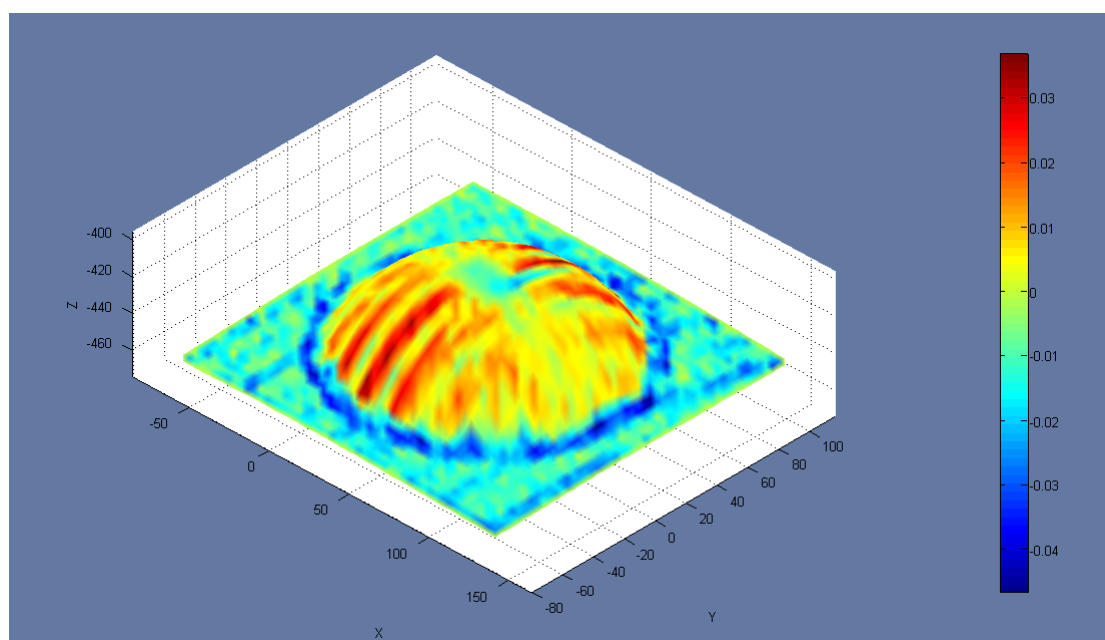


Figura 5.24: Caso de estudo de 'minor strains' na geometria G1

Por fim, para cada caso de estudo, são apresentadas as deformações em percentagem, num mapa de deformações. Este mapa permite visualizar as deformações presentes na chapa metálica e ainda, se for conhecida a curva de limite de conformação CLC, avaliar e aproximar os pontos críticos do limite de conformabilidade. A figura 5.25 ilustra o referido mapa de deformações para o caso de estudo da geometria G1. Cada ponto visível no mapa de deformações representa o valor de deformações de cada triângulo obtido pelo método de Vogel e Lee anteriormente detalhado. Adicionalmente, nos anexos (Apêndice G - Mapas de deformações), estão presentes os mapas de deformação para outros casos de estudo.

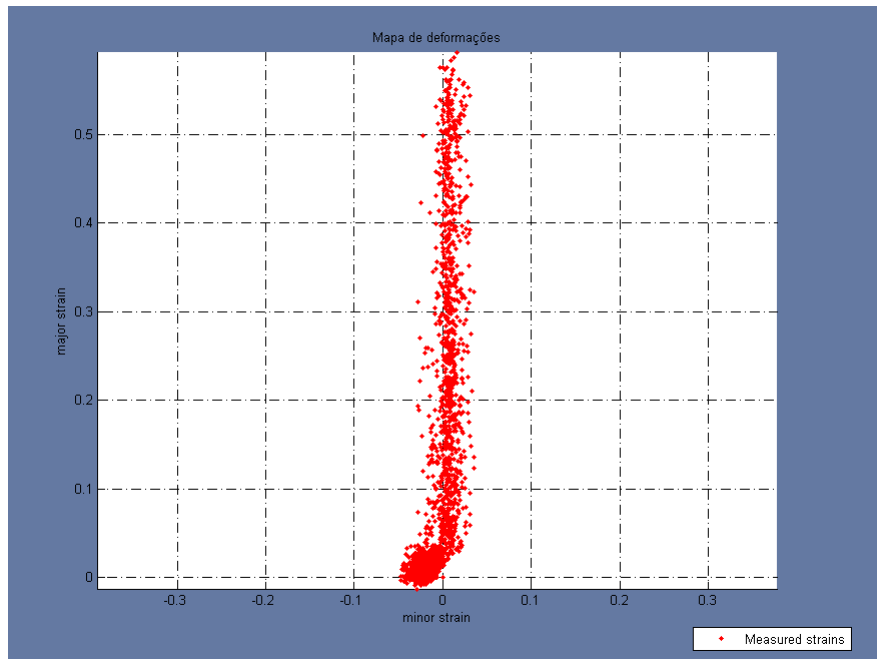


Figura 5.25: Caso de estudo do mapa de deformações na geometria G1 (%)

Capítulo 6

Discussão de resultados

6.1 Reconstruções tridimensionais (3D)

6.1.1 Análise quantitativa da reconstrução tridimensional (3D)

De forma a quantificar o erro de precisão das reconstruções 3D efetuadas, é necessário comparar os modelos obtidos pelo sistema desenvolvido com os modelos reais. Para esse efeito, foi utilizada uma máquina de medição de coordenadas com contacto (3D). Um determinado exemplar real foi colocado no espaço de trabalho de uma máquina de coordenadas MMC com apalpador (fig.6.1).

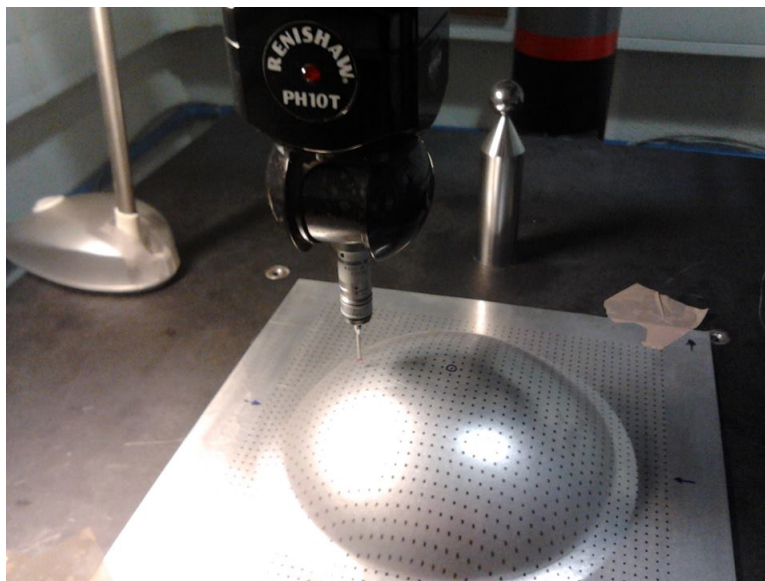


Figura 6.1: Processo medição em MMC

Seria possível medir as coordenadas de todos os pontos do padrão ou interseções das linhas presentes na chapa e simplesmente calcular o erro relativo de cada um desses pontos em relação aos pontos obtidos pelo sistema desenvolvido. No entanto, esta metodologia seria pouco apropriada, dada a quantidade de pontos existentes e possibilidade de erros humanos.

Então, a metodologia adotada foi colocar a peça em estudo alinhada com o sistema de

coordenadas de referência da máquina MMC, de forma a que a origem do referencial da chapa metálica fosse a origem da máquina de medição de coordenadas. Posteriormente, foi fixa uma determinada ordenada, para que, ao mudar o valor da abcissa, para a mesma ordenada, se obtivesse um valor de profundidade diferente. Para melhor compreensão, a figura seguinte (fig.6.2) exemplifica o processo referido:

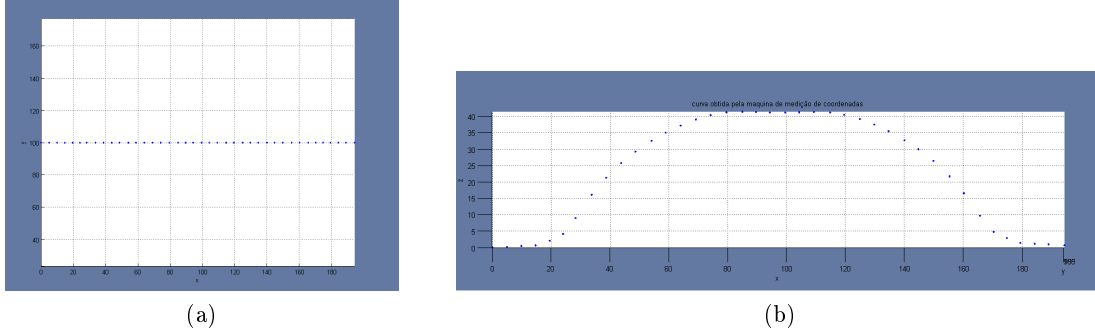


Figura 6.2: A figura (a) mostra a vista de cima dos pontos obtidos pela MMC. A figura (b) mostra a vista de frente dos pontos obtidos pela MMC. (unidades em mm)

Posteriormente, em relação à reconstrução tridimensional obtida pelo sistema desenvolvido, para a mesma abcissa utilizada no processo de medição por MMC, foi interpolada uma curva de perfil do modelo 3D, como mostra a figura 6.3.

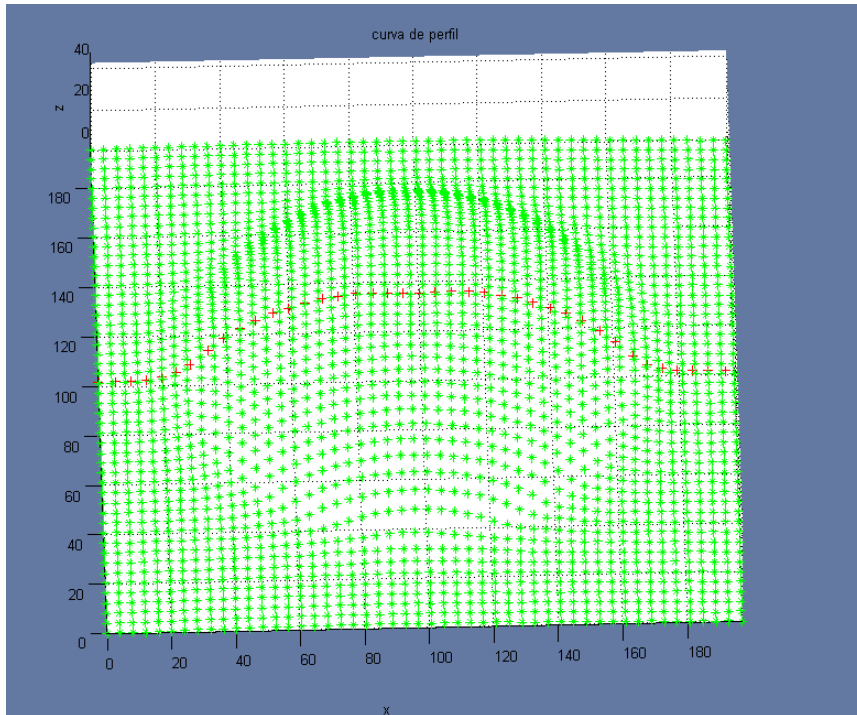


Figura 6.3: Curva de perfil interpolada (mm)

Através dessa interpolação, obtemos os pontos correspondentes a um corte da peça (fig.6.4), semelhante à obtida pelo processo de medição por coordenadas.

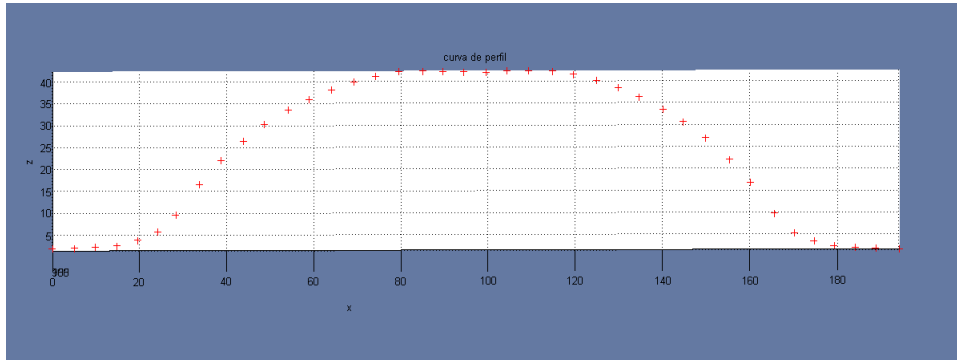


Figura 6.4: Curva de perfil - G1 (mm)

Dado que foram utilizadas as mesmas abcissas e ordenadas na estimativa das duas curvas, apenas o valor de profundidade (Z) é variável. A figura 6.5 permite visualizar as diferenças de profundidade dos dois métodos utilizados.

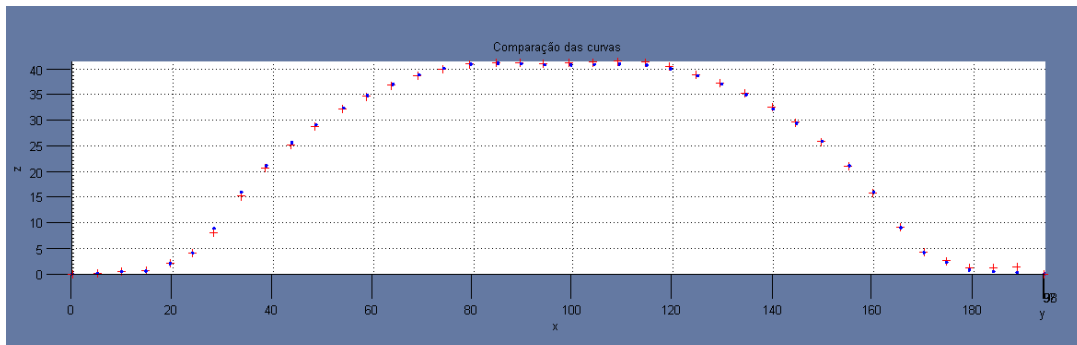


Figura 6.5: Diferenças entre curvas de perfil (mm)

Para obter também um valor real do erro da reconstrução tridimensional, foram utilizadas as medidas de Desvio Médio absoluto (6.1) e Erro Médio Quadrático (6.2). Assumindo os valores obtidos através do método de medição por Máquinas de Medição MMC como referência, estas duas técnicas de medidas de precisão, sendo 'e' o erro associado a cada medição e 'n' o número total de medições realizadas, ou neste caso, o número de pontos em estudo.

$$DMA = \frac{\sum |e|}{n} [mm] \quad (6.1)$$

$$EQM = \frac{\sum (e^2)}{n} [mm^2] \quad (6.2)$$

No caso de estudo presente em 6.5, foram obtidos os valores de $DMA = 0.276 \text{ mm}$ e $EQM = 0.138 \text{ mm}^2$.

Este processo foi repetido para outros casos de estudo e os seus valores registados. Na tabela seguinte (tab.6.1) estão documentados os valores obtidos para os diferentes ensaios.

Tipologia	Padrão e frequência	Baseline Medium		Baseline Wide	
		EQM [mm^2]	DMA [mm]	EQM [mm^2]	DMA [mm]
Calote	50x50 Pontos	0,57	0,53	0,13	0,27
	40x40 Linhas	1,80	1,01	0,32	0,46
Pirâmide	50x50 Pontos	0,43	0,46	0,29	0,48
	40x40 Pontos	0,59	0,70	0,84	0,75
Tornado	40x40 Pontos	0,61	0,54	0,41	0,52
Total		4,0	3,24	1,99	2,48

Tabela 6.1: Tabela de precisões

Observando a tabela 6.1, é possível concluir que os resultados segundo um *baseline* maior obtêm um erro menor. Este resultado vai de encontro ao que G.Kaebler enuncia [39]. Adicionalmente, verifica-se que aumentando a densidade dos pontos ou linhas, os erros também diminuem. Este resultado também é de esperar, dado que uma maior densidade do padrão aumenta a densidade da malha e consequentemente diminui o erro por interpolação.

Outro aspeto estudado foram as zonas de maior erro. Verificou-se que, através da análise visual da comparação das curvas, as zonas com maior erro absoluto são, normalmente, as zonas de inclinação mais acentuada. A exemplo disso, a figura 6.6 ilustra o referido. Assinalado a vermelho observa-se a zona com maiores erros. Este acontecimento pode ser explicado pelo facto de que, como o material é mais deformado nesta zona, a densidade de pontos diminui, pelo que a interpolação dos pontos nestas zonas não é tão precisa.

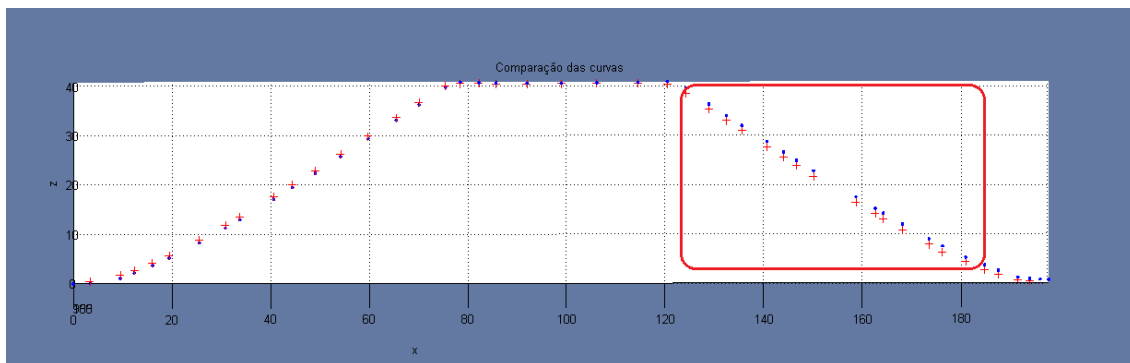


Figura 6.6: Zona de maiores erros (mm)

6.1.2 Análise qualitativa da reconstrução tridimensional (3D)

As reconstruções tridimensionais efetuadas corresponderam às expectativas. Para qualquer um dos casos de estudo citados no capítulo 5, a nuvem de pontos obtida identifica a peça real.

As superfícies criadas de cada uma das nuvens de pontos também representam uma superfície suave semelhante à real. A densidade de pontos do padrão foi neste aspeto o fator mais preponderante: quanto maior o número de pontos ou linhas utilizadas, mais densa será a malha, e consequentemente mais real e precisa será a nuvem de pontos.

Pelo visionamento da superfície reconstruída a partir da nuvem de pontos de um caso de

estudo aleatório temos ainda a imediata percepção da área deformada, ou seja, a zona da chapa que sofreu conformação plástica.

Apesar de tudo isto, notou-se que grande percentagem dos erros verificados provêm da marcação do padrão na chapa metálica. Embora o Robot Fanuc tenha uma elevada precisão, existe uma folga inevitável entre a caneta de acetato utilizada e o manipulador do Robot, pelo que existe algum erro na marcação. O sistema de medição ótico ARGUS já referido no capítulo 2 permitiu confirmar este facto. Através da análise da distância entre dois pontos consecutivos numa zona não deformada da chapa metálica verificou-se que a distância dada inicialmente entre dois pontos consecutivos do padrão não era exatamente respeitada. A figura 6.7 mostra um exemplo do referido.

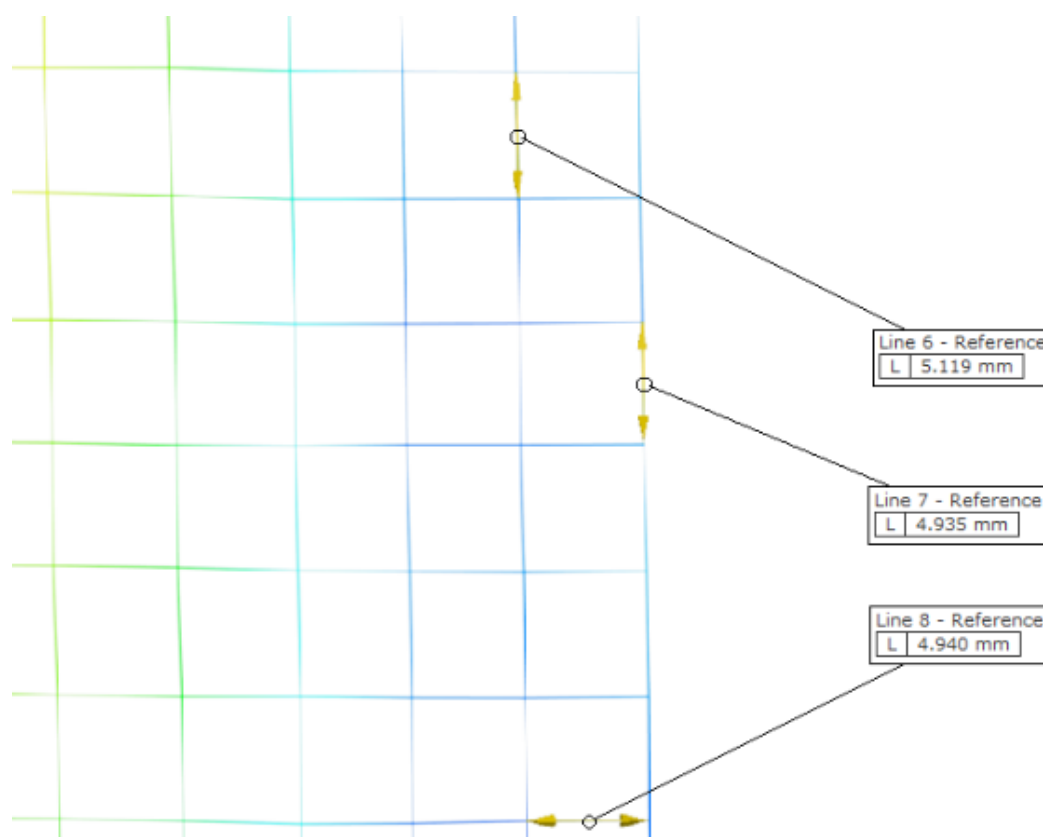


Figura 6.7: Distância entre dois pontos

Como se pode observar na figura 6.7, a distância entre 2 pontos consecutivos, medida pelo sistema ARGUS, não corresponde a exatamente 5 mm.

6.2 Deformações

6.2.1 Análise quantitativa do processo de deformações

A metodologia proposta por Vogel e Lee permitiu calcular o campo das deformações na superfície da chapa metálica. A figura 6.8 representa as deformações maiores ('major strains') para um determinado caso de estudo com a geometria G1. A *colorbar* da figura (fig.6.8) apresenta as deformações presentes, em percentagem (%).

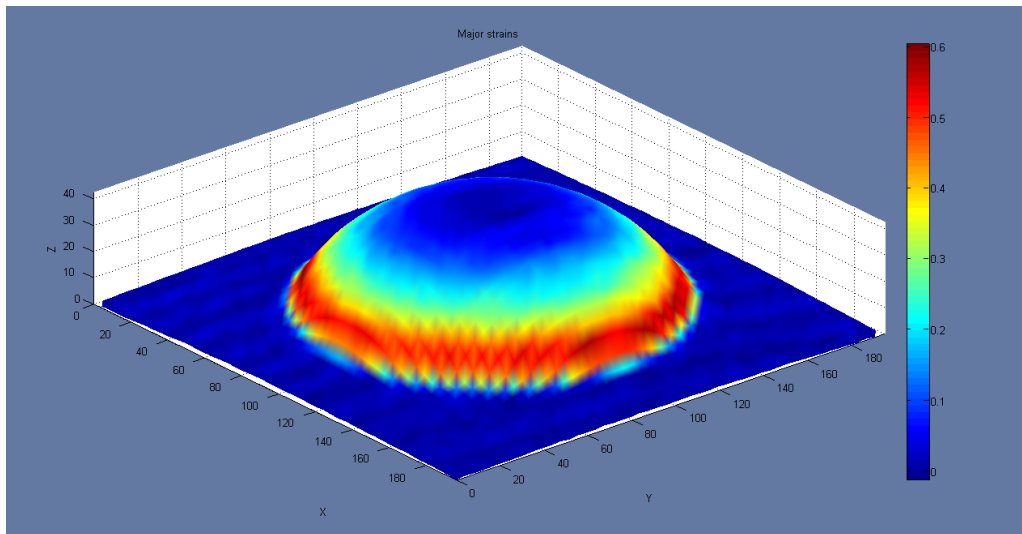


Figura 6.8: Campo de deformações 'major strains' - G1 (mm)

Os resultados utilizando os dois processos de organização de triângulos - Triângulos na Diagonal e Triângulos em Losângulos - demonstraram coerência nos valores obtidos. Em ambos os processos, os resultados obtidos das deformações verdadeiras ('true strains') foram semelhantes, tal como se pode observar na figura seguinte (fig.6.9). Para um determinado nó aleatório, os resultados, apresentados em percentagem (%), são idênticos.

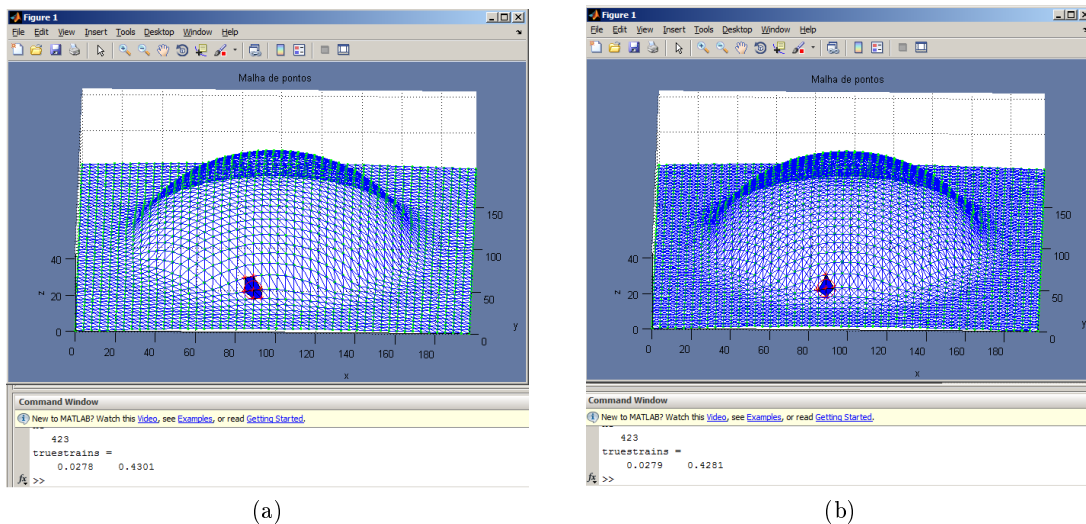


Figura 6.9: Deformação para um ponto específico

Pela análise dos níveis de deformação, é possível também concluir que a geometria que sofre maiores deformações é a Geometria 1 - Calote - que pode atingir deformações na ordem de 60% nas zonas de maior inclinação. Segue-se a Geometria 3 - Tornado - que contém deformações máximas na ordem dos de 50%, mas apenas nas áreas próximas dos vincos da chapa. A Geometria 2 - Pirâmide - sofre deformações máximas de valores mais baixos do que as geometrias anteriores, mas em contrapartida estes valores englobam

uma área maior da chapa metálica. Foi possível ainda comparar e validar as deformações do sistema desenvolvido com as do sistema ARGUS. A figura em baixo (fig.6.10) ilustra a interface do sistema ARGUS, com um caso de estudo e calibradores utilizados.



Figura 6.10: Caso de estudo utilizando ARGUS

Consequentemente, para um exemplar de cada geometria estudada (G1,G2 e G3), foram calculadas e comparadas as deformações presentes na chapa da mesma forma, utilizando os dois sistemas referidos. A figura 6.11 representa os resultados obtidos para o caso de estudo da geometria G1, visível na figura acima (fig.6.10)

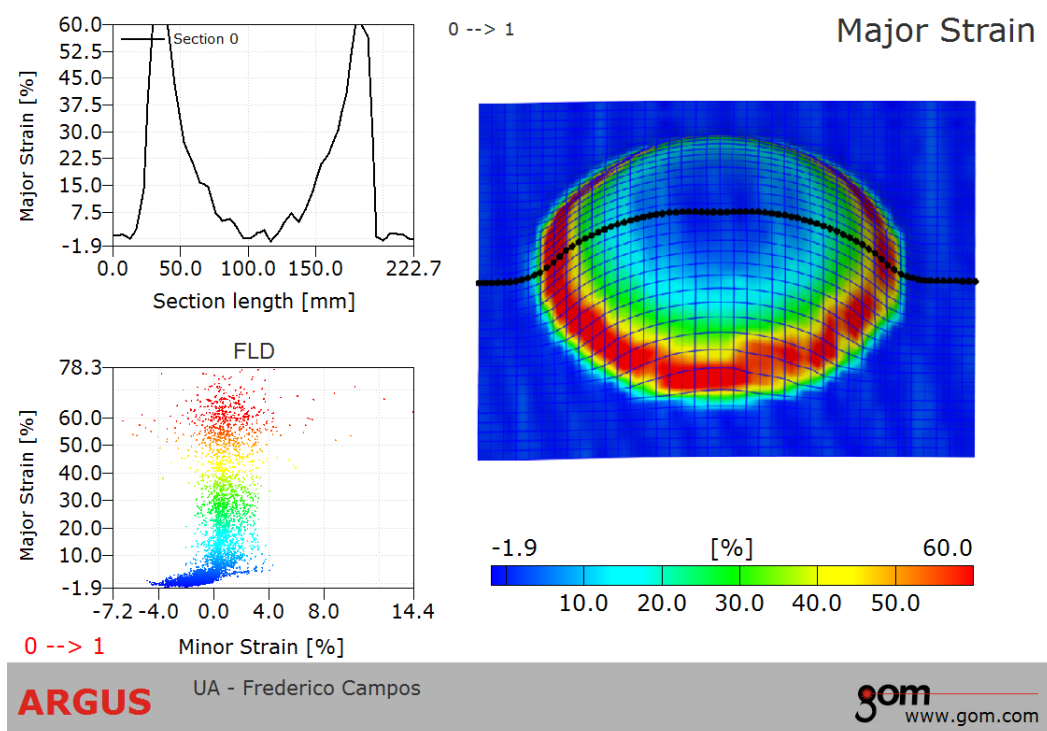


Figura 6.11: Caso de estudo utilizando ARGUS - G1

Os resultados obtidos pelo sistema Argus revelaram significantes semelhanças em relação ao sistema desenvolvido ao longo deste trabalho (apêndice H - Aquisição com sistema Argus). Para a geometria em causa, temos deformações da mesma ordem, pelo que confirma a utilidade do sistema desenvolvido.

Adicionalmente, podemos comparar os mapas de deformação. A figura 6.12 representa o mapa de deformações (obtido pelo sistema desenvolvido) para a geometria G1, utilizando a escala semelhante à obtida pelo sistema ARGUS na figura 6.11.

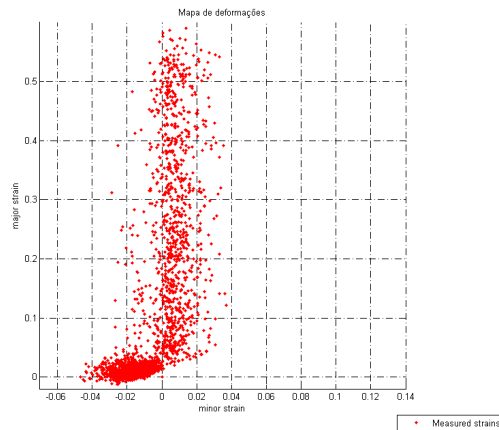


Figura 6.12: Caso de estudo utilizando ARGUS - G1 (%)

6.2.2 Análise qualitativa do campo de deformações

Observe-se as figuras em baixo para deformações maiores nas geometrias G1,G2 e G3 (fig.6.13, fig.6.14 e fig.6.15). As unidades encontram-se em milímetros (mm) enquanto que a *colorbar* apresenta os valores de deformações em percentagem (%).

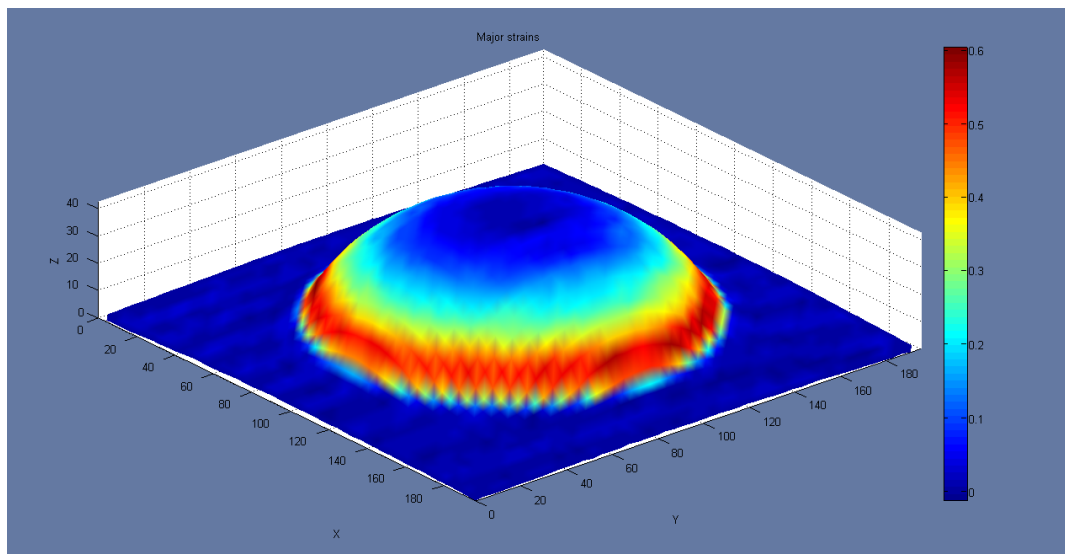


Figura 6.13: Campo de deformações 'major strains' - G1,V2

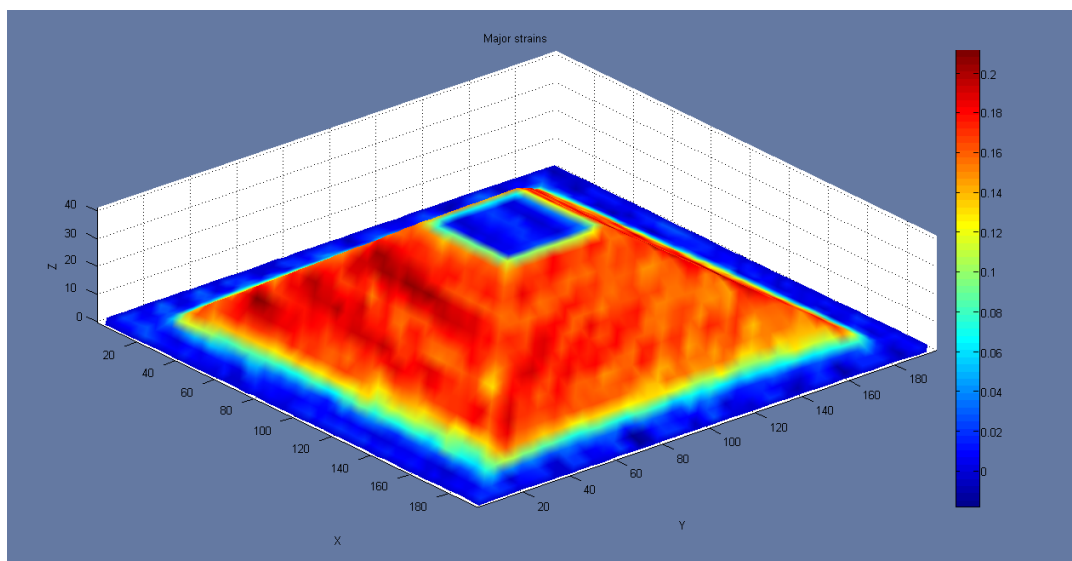


Figura 6.14: Campo de deformações 'major strains' - G2,V2

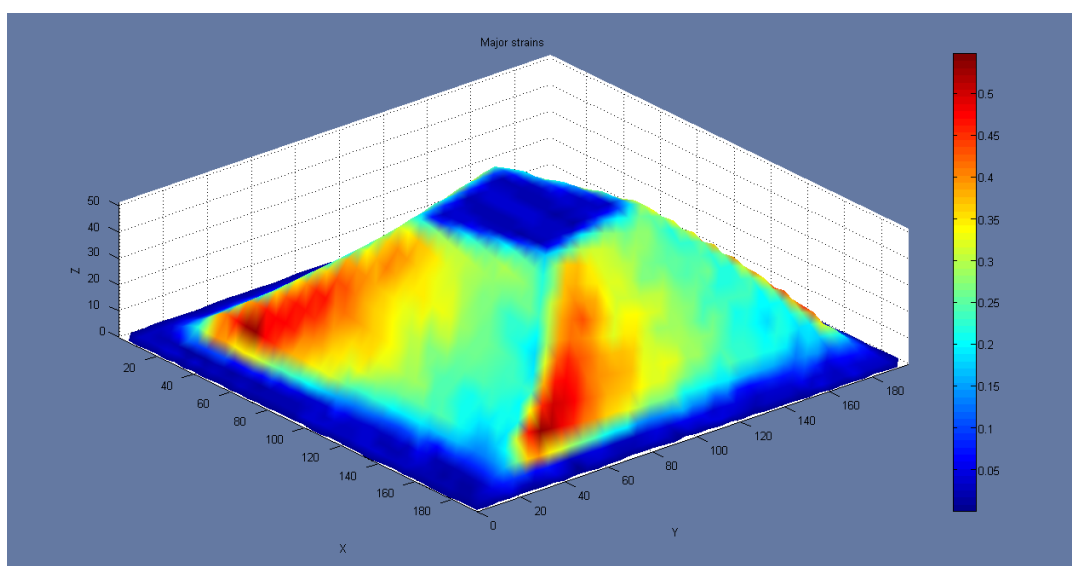


Figura 6.15: Campo de deformações 'major strains' - G3,V2

Pela análise gráfica da distribuição das deformações maiores apresentadas, utilizando a disposição de triângulos V2 (em diagonal), verificamos que as zonas com maiores deformações são as zonas com maior inclinação da chapa, pelo que são também as zonas com maior probabilidade de rutura. Ficaram assim identificadas as zonas críticas da peça.

Adicionalmente, o sistema desenvolvido neste trabalho permite visualizar o gráfico de deformações para um dado corte da peça, em relação ao comprimento da peça. É interessante observar a fig.6.16. Para um dado caso de estudo da geometria G1, confirmamos que as zonas críticas da peça são as zonas de maior inclinação e que, em contrapartida, as zonas mais paralelas ao eixo xy da peça apresentam deformações maiores quase nulas,

como seria de esperar.

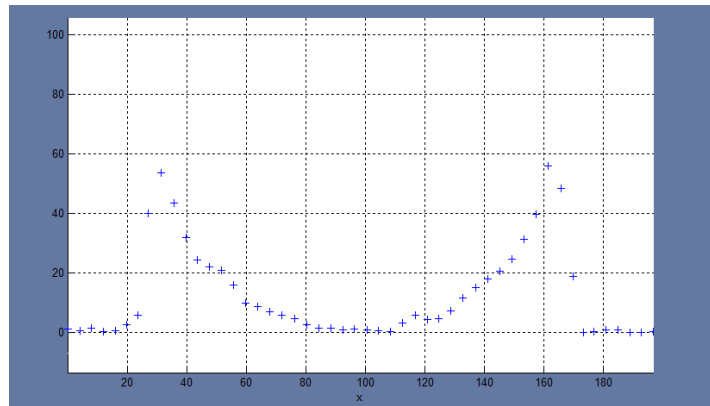


Figura 6.16: Curva de deformações - G1

A teoria da plasticidade garante ainda que as deformações plásticas são realizadas a volume constante. Assim sendo, se por um lado as zonas de maior inclinação da peça apresentam maiores deformações, por outro lado estas zonas são as que têm menor espessura. É também interessante verificar que as deformações apresentam valores semelhantes para distâncias iguais ao centro da peça, no caso de peças simétricas. Se observarmos uma vista de cima da distribuição de deformações, no caso de uma geometria simétrica notamos que para uma distância constante para o centro da peça, as deformações apresentam valores semelhantes. A figura 6.17 ilustra essa distribuição na geometria G1. As deformações, neste caso, apresentam os seus valores dispostos em anéis com níveis de deformação distintos.

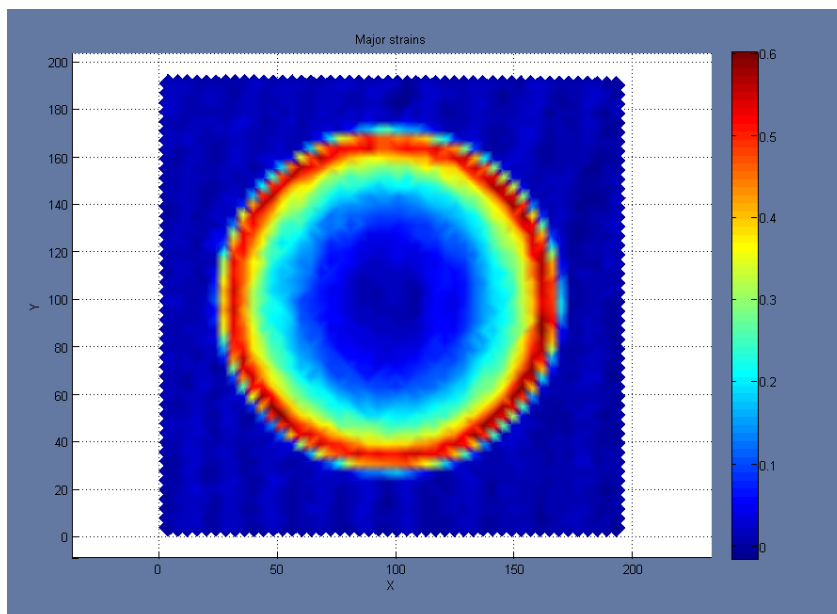


Figura 6.17: Análise da simetria das 'major strains' - G1,V2

Da mesma forma, na estampagem da geometria G2, a análise de resultados insere-se no comportamento explicado acima.

Contudo, a geometria G3, que tem uma forma mais complexa e axissimétrica, comporta-se de maneira diferente. As zonas mais críticas assinaladas a vermelho na imagem são aquelas que efetivamente apresentam os maiores alongamentos. Este acontecimento é bastante interessante, e permite concluir e justificar a direção dos contornos da ferramenta utilizada na máquina de estampagem incremental. Por fim, através da análise das deformações menores (minor strains) visíveis nas figuras em baixo (fig.6.18, fig.6.19 e fig.6.20), pode-se verificar algo interessante: numa das direções obteve-se deformações menores de maior escala do que na direção perpendicular às mesmas. Este acontecimento deve-se à anisotropia do material. Como os grãos do alumínio estão orientados de uma determinada forma, originam deformações maiores numa direção e consequentemente menores na direção perpendicular.

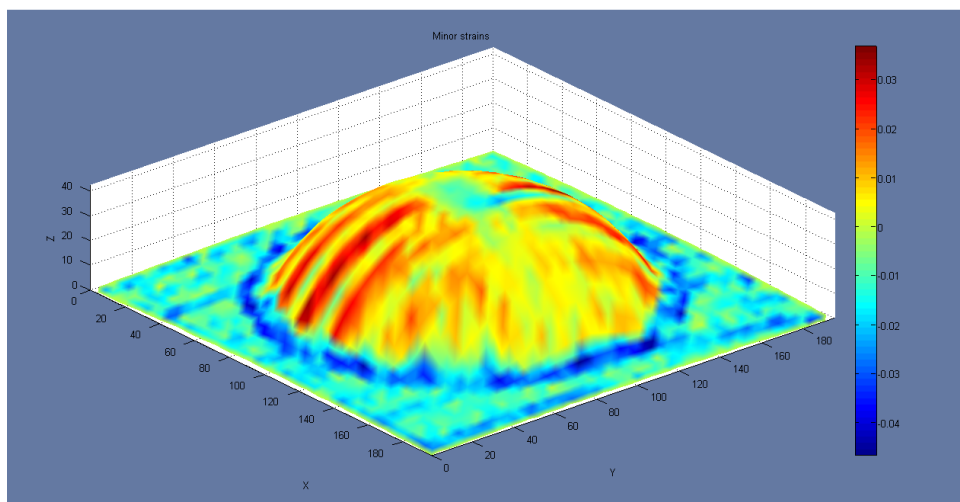


Figura 6.18: Campo de deformações 'minor strains' - G1,V2

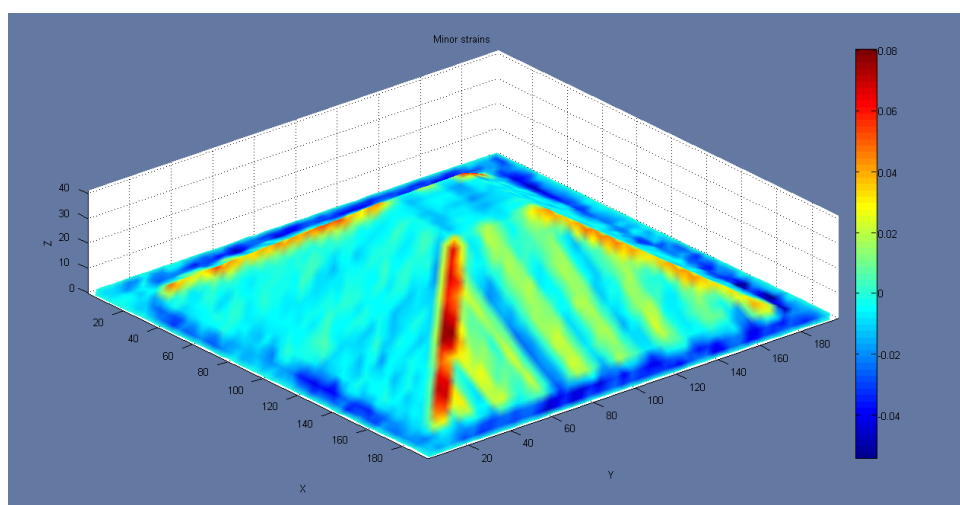


Figura 6.19: Campo de deformações 'minor strains' - G2,V2

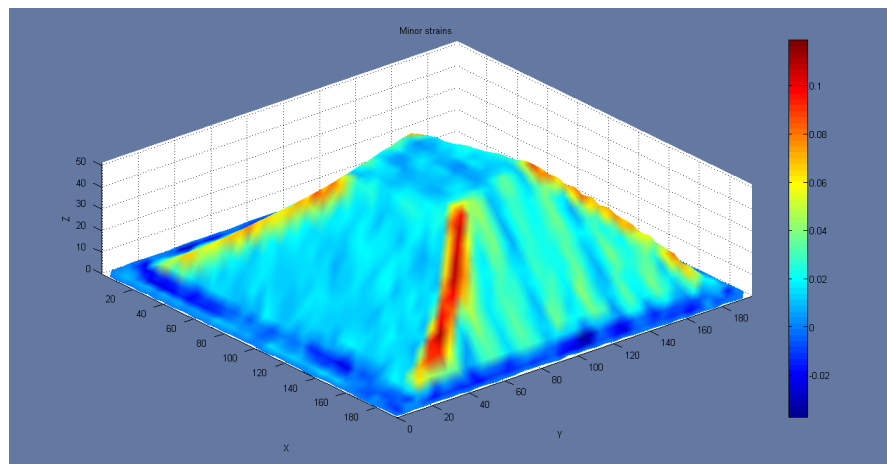


Figura 6.20: Campo de deformações 'minor strains' - G3,V2

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões

Os ensaios realizados nesta dissertação demonstram que a Visão Artificial é uma ferramenta que pode ser utilizada para medição em processos de conformação plástica. O sistema desenvolvido utilizando as técnicas de estereoscopia, permitiu alcançar os objetivos propostos no início deste trabalho, como ficou evidenciado no capítulo 6 - Discussão de Resultados. Para todos os casos de estudo realizados, foram reconstruídos os modelos tridimensionais, bem como analisados os campos de deformações.

Ao longo do trabalho efetuado nesta dissertação de Mestrado foi possível demonstrar que as técnicas de Visão Artificial para medição ainda estão a evoluir e a sua aplicação a nível industrial pode ser útil em diversas aplicações: foi possível monitorizar a deformação plástica em chapas metálicas, detetando claramente as zonas de maior probabilidade de rutura e consequentemente, as mais críticas. Os resultados obtidos, como mostram as inúmeras representações gráficas, permitem ainda calcular e avaliar, localmente ou globalmente as deformações verificadas na chapa metálica.

Pela análise do erro medido através do processo de medição do desvio médio absoluto (DMA) para o sistema desenvolvido, como demonstrado no capítulo 6 - Discussão de Resultados, podemos concluir que este método de medição e avaliação do estado de deformações apresenta vantagens em relação a outros métodos convencionais tais como a Mylar Tape (descrita no capítulo 2). Adicionalmente, ao contrário dos métodos convencionais, o presente método permitiu calcular o campo de deformações simultaneamente em todas as zonas da chapa.

No que respeita à densidade do padrão, conclui-se que aumentando a sua densidade obtém-se um menor erro medido por EQM (mm^2) e por DMA (mm) em todas as *baselines*. Quanto às *baselines*, conclui-se que uma maior distância entre as câmaras também diminui os erros medidos. Ambas estas conclusões estão evidenciadas na tabela 6.1. O cálculo dos erros presentes nesta tabela foi obtido por comparação entre o modelo resultante do sistema desenvolvido utilizando a técnica de Visão Artificial e medições reais das chapas conformadas com recurso a uma máquina de medição de coordenadas por pontos.

Por fim, o sistema ficou também validado através da comparação dos resultados obtidos pelo método proposto nesta dissertação com os resultados obtidos pelo sistema de medição ótico comercial ARGUS (referenciado no capítulo 2 - Estado de arte).

7.2 Trabalho futuro

Entre os dilemas mais comuns em visão artificial está o compromisso entre a precisão e o tempo real, motivado principalmente pela necessidade da medição. Algumas aplicações requerem tempo real enquanto que em outras este requisito pode ser abdicado em favor da precisão, optando por uma solução offline. Como trabalho futuro seria interessante adaptar o sistema desenvolvido para um sistema em tempo real, sem comprometer a precisão. Assim, seria possível controlar as deformações da chapa metálica à medida que esta fosse conformada. Se a curva CLC for previamente conhecida, seria possível deformar a chapa, conforme a necessidade, até à situação limite imediatamente antes sua ruptura.

Seria ainda interessante otimizar o sistema implementado, de forma a poder calcular e desenhar graficamente as curvas de limite de conformação em processos de estampagem. Ainda, a título de desenvolvimento e melhoria deste trabalho, seria interessante adotar um método de marcação das chapas metálicas mais rigoroso, tal como *electroetching* (marcação com elementos químicos), dado que o presente processo de marcação acarreta um nível acrescido de possíveis erros.

Outra situação interessante para trabalho futuro é a de poder extrair e aproveitar a informação tridimensional que os segmentos das linhas deformadas providenciam, no caso do padrão das linhas, prevendo que estes segmentos possam fornecer informação adicional e mais rigorosa do que o presente método utilizado nesta dissertação.

Referências

- [1] A. L. Bastos, *Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação*. PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- [2] E. Leszak, “Apparatus and process for incremental dieless forming,” *US Patent 3,342,051*, 1967.
- [3] J. I. V. Sena, *Estampagem incremental : um novo conceito de produção*. PhD thesis, Universidade de Aveiro, 2009.
- [4] S. Netto and N. Malveira, “Determinação da curva limite de conformação para alumínio aeronáutico 6061-O,” *... de Engenharia de ...*, 2003.
- [5] L. N. A. Conforma and D. E. C. Met, “Previsão da curva limite da estrição local na conformação de chapas metálicas,” 2009.
- [6] R. A. Santos, “Avaliação da Curva de Limite de Conformação,” no. 7.
- [7] Mevlut Turkoz, Osman Yigit, and M. Dilmec, “Construction of Forming Limit Diagrams,” 2010.
- [8] H. Hu, J. Liang, Z. Tang, X. Guo, and L. Li, “Digital speckle based strain measurement system for forming limit diagram prediction,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 55, pp. 12–21, Apr. 2014.
- [9] B.-Q. Shi and J. Liang, “Circular grid pattern based surface strain measurement system for sheet metal forming,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, pp. 1186–1195, Sept. 2012.
- [10] R. U. Kumar, “Analysis of major strains and minor strains in sheet metal forming,” vol. 2, no. 2, pp. 194–198, 2013.
- [11] H. Chan, A. Spence, and M. Sklad, “Laser digitizer-based sheet metal strain and surface analysis,” *International Journal of Machine Tools ...*, vol. 47, pp. 191–203, 2007.
- [12] M. S. Goldstein, J. P. Mitchell, R. V. Fleisig, and A. D. Spence, “Design of a Close-Up Stereo Vision Based Sheet Metal Inspection System,” Tech. Rep. Figure 2, McMaster University.
- [13] K. Galanulis, “Optical Measuring Technologies in Sheetmetal Processing,” pp. 21–23, 2007.

- [14] M. Sutton, P. Cheng M, and C. Yj, “Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis,” tech. rep., 1986.
- [15] Z. Tang, J. Liang, Z. Xiao, and C. Guo, “Large deformation measurement scheme for 3D digital image correlation method,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, pp. 122–130, Feb. 2012.
- [16] D. C. Oliveira, “Reconstrução 3d de chapas conformadas através de visão artificial, Master thesis,” 2014.
- [17] Gom, “User Manual,” 2009.
- [18] J. M. Monteiro, *Métodos de interferometria*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [19] A. Valla, J. Konnerth, D. Keunecke, P. Niemz, U. Müller, and W. Gindl, “Full field and highly sensitive in-plane deformation measurements,” *Wood Science and Technology*, vol. 45, pp. 755–765, Dec. 2010.
- [20] G. O. M. Techniques, “ARGUS - Optical 3D Sheet Metal Forming Analysis.” <http://www.gom.com/3d-software/argus-software.html>, 2014.
- [21] V. O. Solutions, “Vialux -AutoGrid .” http://vialux.de/HTML/en_comp.htm, 2014.
- [22] V. O. Solutions, “AUTOGRID - Optical 3D Sheet Metal Forming Analysis.” http://www.vialux.de/pdf/E_Aip.pdf, 2014.
- [23] F. F. M. T. Innovations, “FMTI - Forming Measure Tools Innovations.” <http://www.fmtisystems.com/index.htm#>, 2014.
- [24] F. F. M. T. Innovations, “FMTI - Model 100 Series .” <http://www.fmtisystems.com/pdf/pamphlet.pdf>, 2014.
- [25] A. A. S. Analysis and M. Environment, “ASAME - Automatic Strain Analysis and Measurement Environment .” <http://www.asametechnology.com/>, 2014.
- [26] A. A. S. Analysis and M. Environment, “ASAME - GPA 100 Model .” <http://www.asametechnology.com/dwn/factsheets/gpa.pdf>, 2014.
- [27] F. R. R. M-6iB, “Fanuc Robotics - Robot M-6iB .” http://www.antenen.com/htdocs/downloads/files/files_dl/M-6iB%20Series.pdf, 2014.
- [28] S. Bijker, “How to perform adequate optical strain measurements on a sheet metal truck bumper,” tech. rep., Eindhoven University of Technology, 2006.
- [29] I. V. Artificial, “Infaimon - Visao Artificial, Camaras inteligentes .” <http://www.infaimon.com/pt/camaras-inteligentes>, 2014.
- [30] T. D. G. M1600, “TELEDYNE DALSA - GENIE M1600 .” <http://www.teledynedalsa.com/imaging/products/cameras/area-scan/genie/CR-GENO-M160X/>, 2014.

- [31] E. Do, R. Do, E. De, and R. De, *Um Método para Determinação da Profundidade Combinando Visão Estéreo e Autocalibração para Aplicação em Robótica Móvel*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.
- [32] C. Wöhler, *3D Computer Vision: Efficient Methods and Applications*. 2009.
- [33] T. Talhada, “Percepção 3D utilizando uma câmara estereo, Master thesis.” 2012.
- [34] J.-Y. Bouguet, “ Camera Calibration Toolbox Matlab .” http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, 2014.
- [35] D. Faria, *Trabalhos Práticos Análise e Processamento de Imagem*. PhD thesis, FEUP, 2010.
- [36] G. R. Derek Bradley, “ Bradley local image thresholding .” <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40854-bradley-local-image-thresholding>, 2014.
- [37] G. R. Derek Bradley, “ Bradley local image thresholding Explanation .” <http://people.scs.carleton.ca/~roth/iit-publications-iti/docs/gerh-50002.pdf>, 2014.
- [38] M. A. José, R. a. Tridimensional, and D. E. B. Custo, “Reconstrução Tridimensional a partir de par de imagens estereo,” 2008.
- [39] G. B. . A. Kaebler, *Computer Vision with the OpenCV Library*. 2008.
- [40] J. V. and D. Lee, “An Automated Two-View Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces,” vol. 6, no. 4, pp. 205–216, 1989.
- [41] E. Schedin and A. Melander, “The evaluation of large strains from industrial sheet metal stampings with a square grid,” *Journal of Applied Metalworking*, vol. 4, pp. 143–156, Jan. 1986.
- [42] D. Gallup, J.-m. Frahm, P. Mordohai, M. Pollefeys, and C. Hill, “Variable Baseline / Resolution Stereo,” 2008.
- [43] P. G. I. in imaging, “ Point Grey - Bumblebee XB3 .” <http://ww2.ptgrey.com/stereo-vision/bumblebee-xb3>, 2014.

Apêndice A

Apêndice - Fanuc

Este apêndice documenta o código utilizado para a marcação do padrão utilizando o Robot Fanuc M-6iB.

- Implementação para marcação do padrão de pontos

```
1: R[1]=40
2: R[2]=0
3:
4: R[3]=40
5: R[4]=0
6:
7: R[5]=6
8: R[6]=10
9:
10: PR[1]=[30]
11:L PR[1] 50mm/sec FINE
12:
13: LBL[100]
14: IF R[3]>R[4],JMP LBL[3]
15: LBL[3]
16: IF R[3]=R[4],JMP LBL[4]
17: IF R[1]>R[2],JMP LBL[1]
18: LBL[1]
19: IF R[1]=R[2],JMP LBL[2]
20:
21: PR[1,3]=PR[1,3]-R[6]
22:L PR=[1] 100mm/sec FINE
23: PR[1,3]=PR[1,3]+R[6]
24:L PR=[1] 100mm/sec FINE
25: PR[1,1]=PR[1,1]+R[5]
26:L PR=[1] 100mm/sec FINE
27: R[2]=R[2]+1
28: JMP LBL[1]
29: LBL[2]
30: PR[1,2]=PR[1,2]+R[5]
31:L PR[1] 100mm/sec FINE
32:
33: R[100]=R[1]*R[5]
34: PR[1,1]=PR[1,1]-R[100]
35:L PR[1] 100mm/sec FINE
36: R[2]=0
37: R[4]=R[4]+1
38: JMP LBL[100]
39: LBL[4]
[End]
```

Figura A.1: Implementação Fanuc - Padrão de pontos

- Implementação para marcação do padrão de linhas

```

1: R[1]=30
2: R[100]=R[1]+1
3: R[2]=0
4:
5: R[3]=200
6:
7: R[4]=15
8: R[5]=R[3]/R[1]
9:
10:
11: PR[1]=PR[30]
12:L PR[1] 100mm/sec FINE
13:
14:
15:
16: IF R[100]>R[2],JMP LBL[1]
17: LBL[1]
18: IF R[100]=R[2],JMP LBL[2]
19:
20:
21: PR[1,3]=PR[1,3]-R[4]
22:
23:L PR[1] 100mm/sec FINE
24: PR[1,1]=PR[1,1]+R[3]
25:L PR[1] 100mm/sec FINE
26: PR[1,3]=PR[1,3]+R[4]
27:L PR[1] 100mm/sec FINE
28: R[2]=R[2]+1
29: PR[1,2]=PR[1,2]+R[5]
30:L PR[1] 100mm/sec FINE
31: PR[1,1]=PR[1,1]-R[3]
32:L PR[1] 100mm/sec FINE
33: JMP LBL[1]
34:
35: LBL[2]
36:L PR[30] 100mm/sec FINE
37: R[2]=0
38: PR[1]=PR[30]
39: IF R[100]>R[2],JMP LBL[3]
40: LBL[3]
41: IF R[100]=R[2],JMP LBL[4]
42:
43:
44: PR[1,3]=PR[1,3]-R[4]
45:L PR[1] 100mm/sec FINE
46:
47: PR[1,2]=PR[1,2]+R[3]
48:L PR[1] 100mm/sec FINE
49: PR[1,3]=PR[1,3]+R[4]
50:L PR[1] 100mm/sec FINE
51: PR[1,1]=PR[1,1]+R[5]
52:L PR[1] 100mm/sec FINE
53: PR[1,2]=PR[1,2]-R[3]
54:L PR[1] 100mm/sec FINE
55: R[2]=R[2]+1
56: JMP LBL[3]
57:
58: LBL[4]
59: PR[1]=PR[30]
60:L PR[1] 100mm/sec FINE
[End]

```

Figura A.2: Implementação Fanuc - Padrão de linhas

Apêndice B

Apêndice - Imagens de calibração

Este apêndice documenta as imagens de calibração para uma câmara e para um dado *baseline*. Como é possível observar (fig.B.1), foram captadas 20 imagens de calibração, com tabuleiro axadrezado, em posições distintas. O mesmo procedimento foi utilizado para a outra câmara, bem como para os outros *baselines*.

- Imagens recolhidas para calibração da câmara esquerda e *baseline wide* :

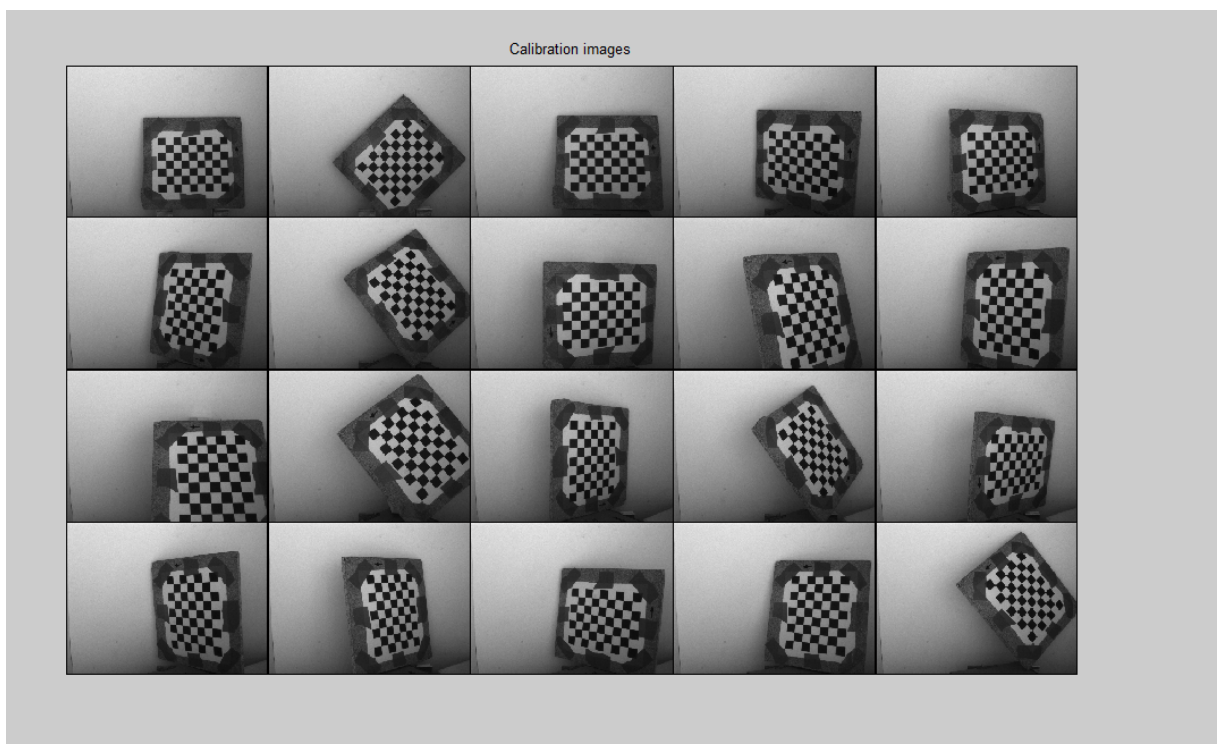


Figura B.1: Imagens de calibração

Apêndice C

Apêndice - Nuvens de pontos

Este apêndice documenta exemplares de nuvens de pontos de cada geometria utilizada durante este trabalho. As coordenadas presentes nas representações gráficas que se seguem encontram-se em milímetros (mm).

- Exemplo de nuvem de pontos para a geometria G1:

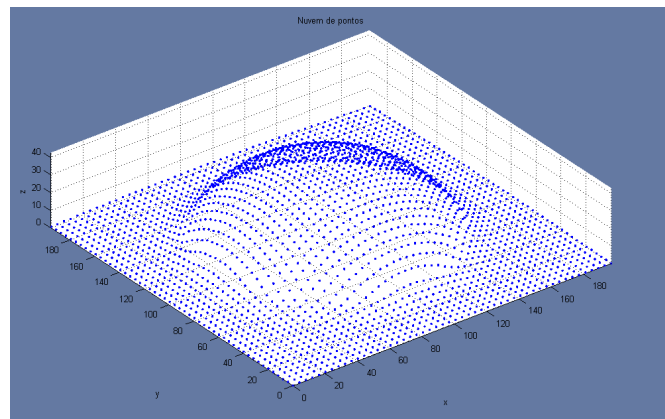


Figura C.1: Nuvem de pontos G1

- Exemplo de nuvem de pontos para a geometria G2:

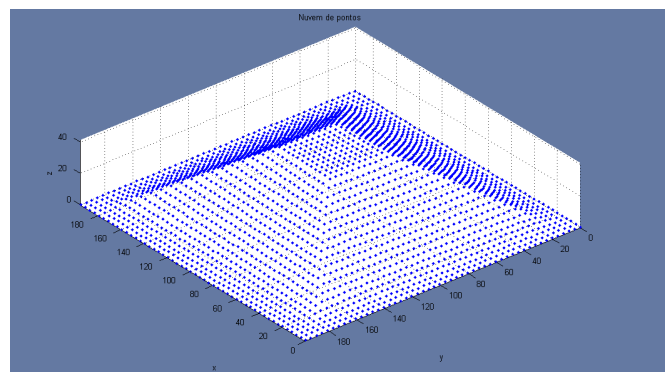


Figura C.2: Nuvem de pontos G2

- Exemplo de nuvem de pontos para a geometria G3:

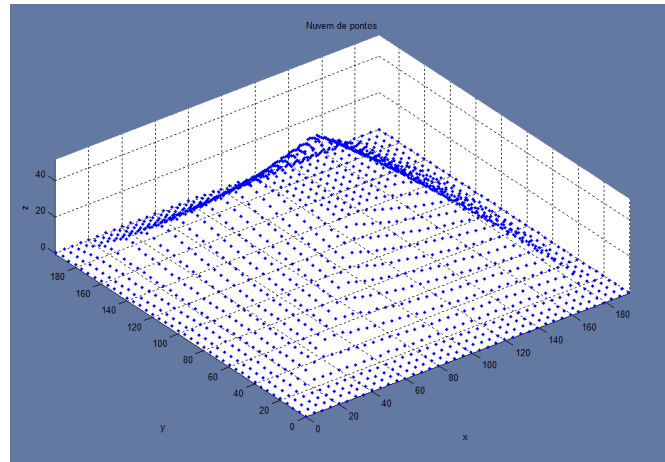


Figura C.3: Nuvem de pontos G3

Apêndice D

Apêndice - Reconstruções

Este apêndice documenta exemplares de reconstruções de cada geometria utilizada durante este trabalho. As coordenadas presentes nas representações gráficas que se seguem encontram-se em milímetros (mm).

- Exemplo de reconstrução para a geometria G1:

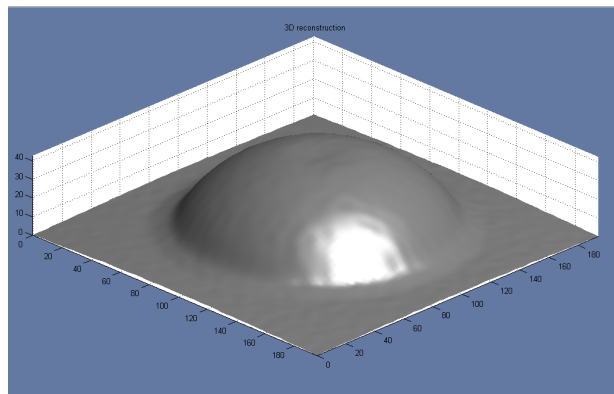


Figura D.1: Reconstrução G1

- Exemplo de reconstrução para a geometria G2:

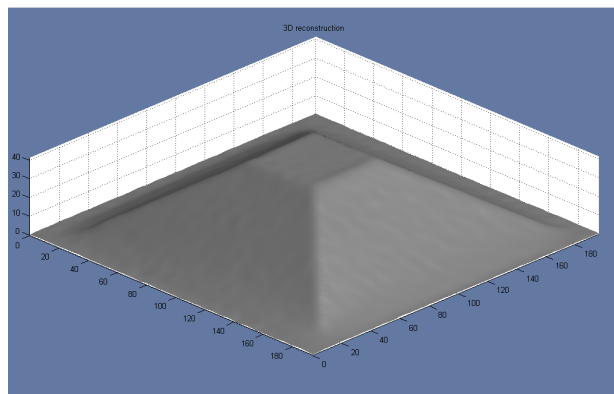


Figura D.2: Reconstrução G2

- Exemplo de reconstrução para a geometria G3:

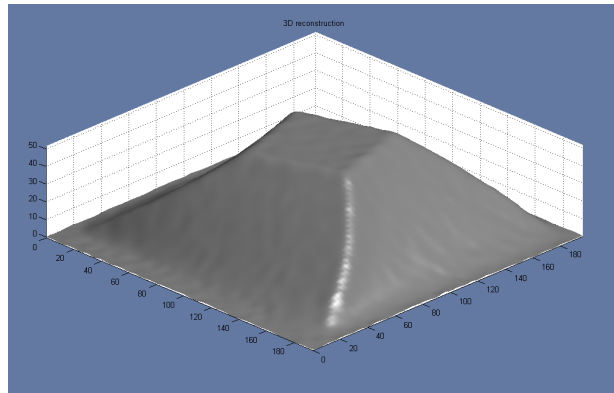


Figura D.3: Reconstrução G3

Apêndice E

Apêndice - Major strains

Este apêndice documenta exemplares do campo das deformações 'major strains' de cada geometria utilizada durante este trabalho. As coordenadas presentes nas representações gráficas que se seguem encontram-se em milímetros (mm). A *colorbar* à direita no entanto classifica as deformações, consoante a cor, em percentagem (%).

- Exemplo do campo de 'major strains' para a geometria G1:

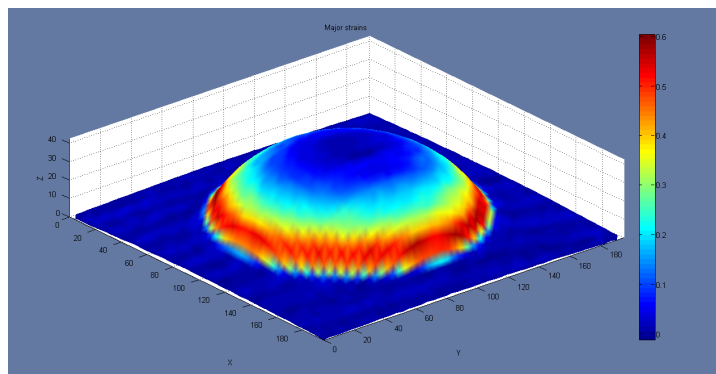


Figura E.1: Major strains G1

- Exemplo do campo de 'major strains' para a geometria G2:

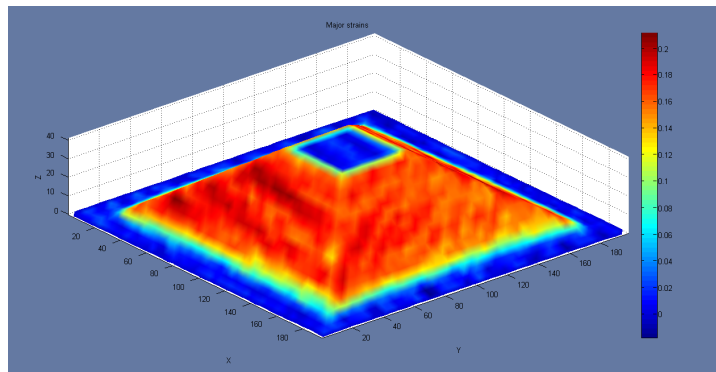


Figura E.2: Major strains G2

- Exemplo do campo de 'major strains' para a geometria G3:

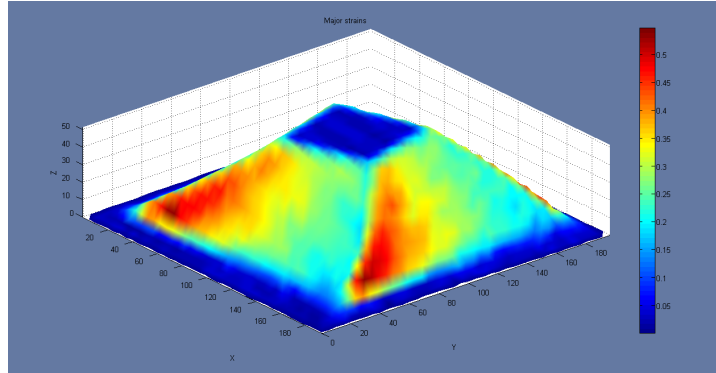


Figura E.3: Major strains G3

Apêndice F

Apêndice - Minor strains

Este apêndice documenta exemplares do campo de deformações 'minor strains' de cada geometria utilizada durante este trabalho. As coordenadas presentes nas representações gráficas que se seguem encontram-se em milímetros (mm). A *colorbar* à direita no entanto classifica as deformações, consoante a cor, em percentagem (%).

- Exemplo do campo de 'minor strains' para a geometria G1:

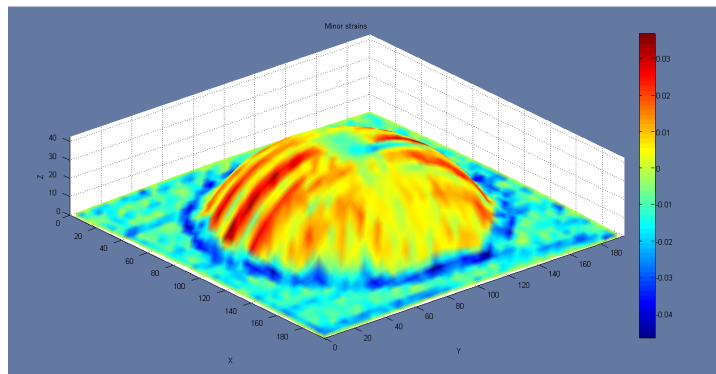


Figura F.1: Minor strains G1

- Exemplo do campo de 'minor strains' para a geometria G2:

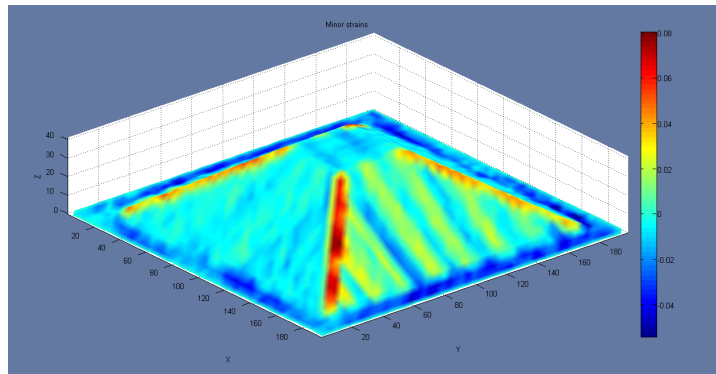


Figura F.2: Minor strains G2

- Exemplo do campo de 'minor strains' para a geometria G3:

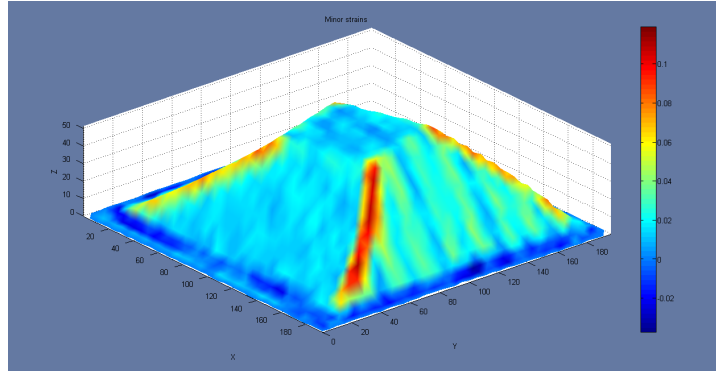


Figura F.3: Minor strains G3

Apêndice G

Apêndice - Mapas de deformações

Este apêndice documenta exemplares dos mapas das deformações de cada geometria utilizada durante este trabalho. As coordenadas presentes nas representações gráficas que se seguem encontram-se em percentagem (%).

- Exemplo do mapa de deformações para a geometria G1:

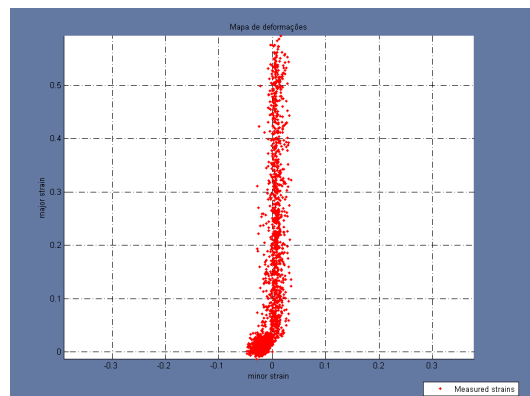


Figura G.1: Mapa de deformações G1

- Exemplo do mapa de deformações para a geometria G2:

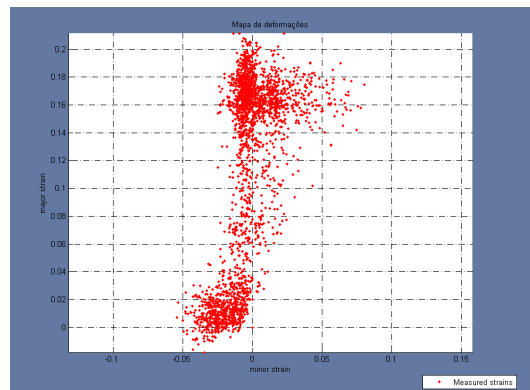


Figura G.2: Mapa de deformações G2

- Exemplo do mapa de deformações para a geometria G3:

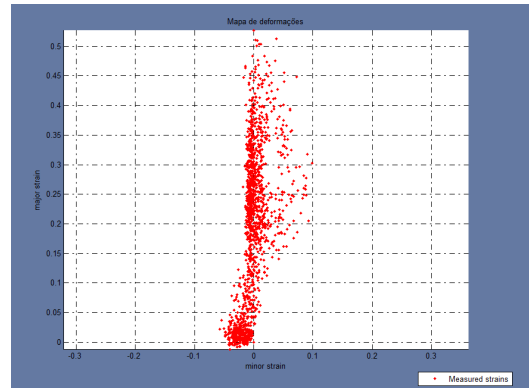


Figura G.3: Mapa de deformações G3

Apêndice H

Apêndice - Aquisição com sistema Argus

Este apêndice documenta as imagens captadas pelo sistema Argus de chapas reais produzidas durante este trabalho, de cada geometria utilizada.

- Imagens recolhidas pelo software Argus para as 3 geometrias utilizadas:

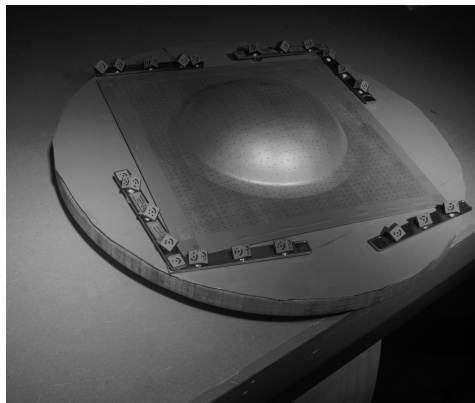


Figura H.1: Sistema Argus - Teste para geometria G1

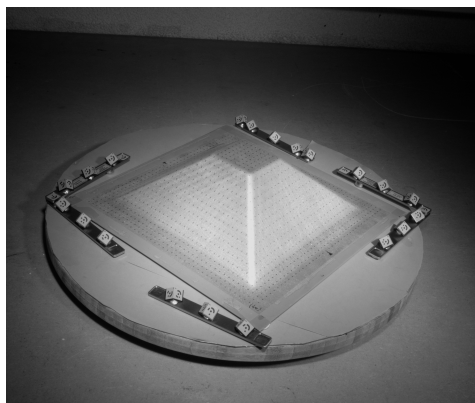


Figura H.2: Sistema Argus - Teste para geometria G2

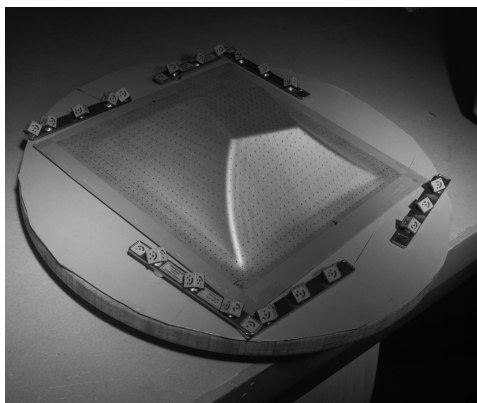


Figura H.3: Sistema Argus - Teste para geometria G3

- Imagens obtidas pelo software Argus para as 3 geometrias utilizadas:

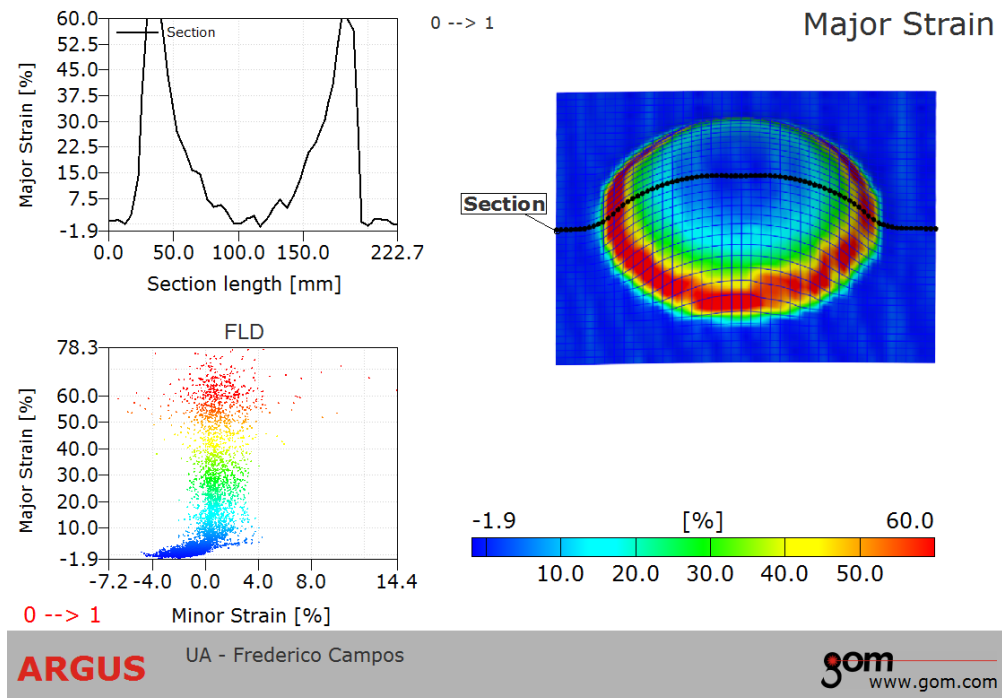


Figura H.4: Sistema Argus - Análise de deformações G1

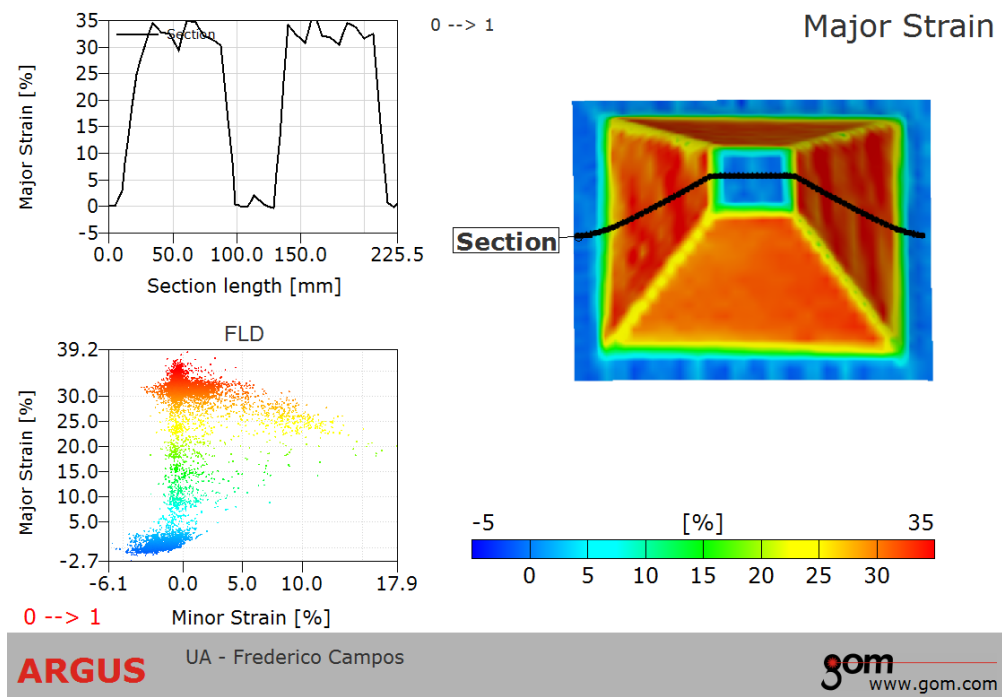


Figura H.5: Sistema Argus - Análise de deformações G2

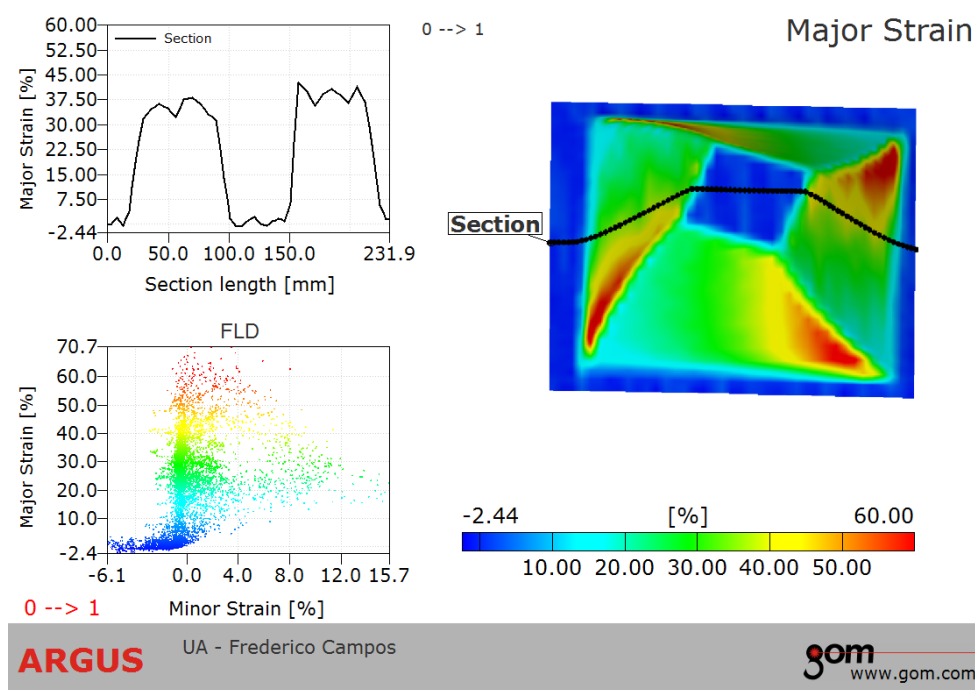


Figura H.6: Sistema Argus - Análise de deformações G3